

BEST AVAILABLE COPY

10/542329

JC17 Rec'd PCT/PTO 13 JUL 2005

EXPRESS MAIL NO. EV336518648US

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applicant(s): Masao SHIMIZU, et al. ) Re: Priority Claim  
U.S. Appln. No.: not yet assigned )  
U.S. Filing Date: concurrently ) Group: not yet assigned  
herewith ) Examiner: not yet assigned  
International Application No: )  
PCT/JP2003/013874 )  
International Filing Date: )  
29 October 2003 ) Our Ref.: B-5770PCT 622825-8  
For: "MULTIPARAMETER HIGH PRECISION )  
CONCURRENT ESTIMATION METHOD AND )  
MULTIPARAMETER HIGH PRECISION )  
CONCURRENT ESTIMATION PROGRAM IN )  
IMAGE SUBPIXEL MATCHING" ) Date: July 13, 2005

35 U.S.C. 119 CLAIM TO PRIORITY

MAIL STOP PCT  
Commissioner for Patents  
P.O. Box 1450  
Alexandria, VA 22313-1450

Attn: United States Designated/Elected Office (DO/EO/US)

Sir:

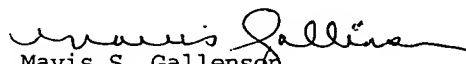
Prior PCT International Application No. PCT/JP2003/013874,  
designating the U.S., claims foreign priority as follows:

<u>COUNTRY</u>	<u>FILING DATE</u>	<u>SERIAL NUMBER</u>
JAPAN	14 January 2003	2003-5557

The certified copy has been filed in prior PCT International  
Patent Application No. PCT/JP2003/013874.

Applicants hereby confirm that this claim for priority applies to  
the above-identified U.S. International stage application.

Respectfully submitted,

  
Mavis S. Gallenson  
Reg. No. 32,464  
Attorney for Applicant  
LADAS & PARRY  
5670 Wilshire Boulevard #2100  
Los Angeles, California 90036  
(323) 934-2300

PCT/JP03/13874

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

29.10.03

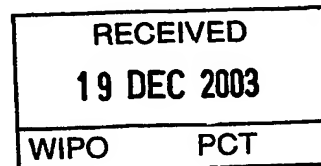
別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日  
Date of Application: 2003年 1月14日

出 願 番 号  
Application Number: 特願2003-005557  
[ST. 10/C]: [JP2003-005557]

出 願 人  
Applicant(s): 財団法人理工学振興会

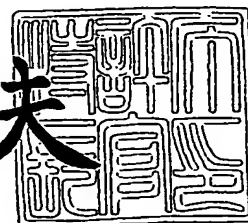


PRIORITY DOCUMENT  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

2003年12月 8日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

今井康夫



【書類名】 特許願

【整理番号】 TIT0216

【提出日】 平成15年 1月14日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G06T 7/00

【発明の名称】 画像のサブピクセルマッチングにおける高精度2次元推定方法

【請求項の数】 2

【発明者】

【住所又は居所】 東京都目黒区大岡山 2-1 2-1 東京工業大学内

【氏名】 清水 雅夫

【発明者】

【住所又は居所】 東京都目黒区大岡山 2-1 2-1 東京工業大学内

【氏名】 奥富 正敏

【特許出願人】

【識別番号】 899000013

【氏名又は名称】 財団法人理工学振興会

【代理人】

【識別番号】 100078776

【弁理士】

【氏名又は名称】 安形 雄三

【選任した代理人】

【識別番号】 100114269

【弁理士】

【氏名又は名称】 五十嵐 貞喜

【選任した代理人】

【識別番号】 100093090

【弁理士】

【氏名又は名称】 北野 進

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 010836

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 画像のサブピクセルマッチングにおける高精度 2 次元推定方法

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 離散的に得られた画像間の類似度値を利用して、連続領域における 2 次元類似度最大位置を推定する画像のサブピクセルマッチングにおける高精度 2 次元推定方法であって、前記画像間の類似度値を使って、水平極値線 H E L 及び垂直極値線 V E L を求め、求めた前記水平極値線 H E L と前記垂直極値線 V E L の交点を前記 2 次元類似度最大位置のサブピクセル推定位置とすることを特徴とする画像のサブピクセルマッチングにおける高精度 2 次元推定方法。

【請求項 2】 2 次元類似度モデルは

$$R_g(s, t, d_s, d_t, \sigma, k, \theta_g) = \text{gauss}((s - d_s) \cos(\theta_g) + (t - d_t) \sin(\theta_g), \sigma) \\ \times \text{gauss}(-(s - d_s) \sin(\theta_g) + (t - d_t) \cos(\theta_g), k\sigma)$$

で表し、ただし、 $(d_s, d_t)$  は画像間の真の変位で、 $\sigma$  はガウス関数の標準偏差で、 $k$  は異方性係数 ( $k > 0$ ) で、 $\theta_g$  は回転角度であり、

前記水平極値線 H E L は前記 2 次元類似度モデルを  $s$  で偏微分して 0 とおくことで、得られた次のような直線であり、

$$s = \frac{at + b}{1} \\ = \frac{(1 - k^2) \sin \theta_g \cos \theta_g}{\sin^2 \theta_g + k^2 \cos^2 \theta_g} t + d_s - \frac{(1 - k^2) \sin \theta_g \cos \theta_g}{\sin^2 \theta_g + k^2 \cos^2 \theta_g} d_t$$

前記垂直極値線 V E L は前記 2 次元類似度モデルを  $t$  で偏微分して 0 とおくことで、得られた次のような直線であり、

$$t = \frac{As + B}{1} \\ = \frac{(1 - k^2) \sin \theta_g \cos \theta_g}{k^2 \sin^2 \theta_g + \cos^2 \theta_g} s + d_t - \frac{(1 - k^2) \sin \theta_g \cos \theta_g}{k^2 \sin^2 \theta_g + \cos^2 \theta_g} d_s$$

前記交点は前記 2 次元類似度モデルを異なる方向に偏微分したときに、どちらの方向にも 0 になる点であり、

$$s = \frac{aB + b}{1 - aA} = d_s$$
$$t = \frac{Ab + B}{1 - aA} = d_t$$

で表す請求項 1 に記載の画像のサブピクセルマッチングにおける高精度 2 次元推定方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、例えば画像による位置計測、リモートセンシング、航空写真を利用した地図作製、ステレオビジョン、画像張り合わせ（モザイクキング）、動画像位置合わせ、3 次元モデリングなど多数の画像処理分野で利用できる、領域ベースマッチングを用いた 2 次元推定方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術】

ステレオ画像処理をはじめとして、トラッキング、画像計測、リモートセンシング、画像レジストレーションなどの多くの画像処理分野では、領域ベースマッチングが基本的な処理として採用されている。

【0003】

領域ベースマッチングは、注目領域のサイズや形状を任意に設定できること、注目画素に対して注目領域をオフセットできること、計算が直感的で直接的な実装が可能であることなどが特徴である。領域ベースマッチングで画像間の変位をサブピクセルで求めるときには、画素単位で離散的に得られる類似度評価値を利用してサブピクセル変位を推定する方法が一般的に利用されている。

【0004】

画像間の対応を求めるためには、類似度と呼ぶ評価値を利用する。類似度とは、画像間の相対的な位置関係を入力、その位置関係のときの画像間の類似度を出力とする関数である。類似度は、画素単位の離散的な位置で値が決まるので、類似度だけをもとに画像間の対応位置関係を求めると、画素単位の分解能に制限される。そこで、類似度値をもとに補間することによって、サブピクセル分解能の

画像間の対応を求める。

【0005】

従来、位置分解能を拡大するために、類似度評価値をフィッティング内挿することでサブピクセル推定を行うことが多い。しかし、画像の平行移動量をサブピクセル分解能で求める際に、画像の水平方向と垂直方向を独立にフィッティング内挿していたため、十分な精度が得られなかったという問題点があった。

【0006】

要するに、従来、デジタル画像を使った領域ベースのマッチングでは、変位の推定分解能を向上するために、画像の水平／垂直方向について独立に類似度評価値を使ったサブピクセル推定を行っていた。

【0007】

また、濃度こう配法を利用して画像間の変位を求めると、はじめからサブピクセル変位量を得ることができる。濃度こう配法では、水平方向と垂直方向を合わせて扱っている。ただし、画像間変位が1画素以上のときには画像を縮小する必要がある。通常は、画像スケールの変更と同時に実装する。濃度こう配法の実装は繰り返し計算になるので、計算時間の見積もりや、ハードウェアへの実装が困難であるという欠点があった。

【0008】

さらに、画像をDFTしてから複素共役積をもとめて逆DFTする手法では、注目領域のサイズが $2^n$ でなければならない、各種テクニックが必要である。流体計測分野では多く用いられ、計算量を小さくできることが特徴である。しかし、ビジョン分野では、ほとんど利用されない。しかも、計測対象が平面であるという仮定を用いているので、凹凸がある計測対象には適用が困難であるという欠点があった。

【0009】

【非特許文献1】

清水雅夫・奥富正敏,「画像のマッチングにおける高精度なサブピクセル推定手法」,電子情報通信学会論文誌D-II,2001年7月,第J84-D-II巻,第7号,p.1409-1418

【0010】

## 【非特許文献 2】

清水雅夫・奥富正敏,「画像のマッチングにおける高精度なサブピクセル推定の意味と性質」,電子情報通信学会論文誌D-II,2002年12月,第J85-D-II巻,第12号,p.1791-1800

## 【0011】

## 【非特許文献 3】

マサオ・シミズ、マサトシ・オクトミ (Masao Shimizu and Masatoshi Okutomi),「プリサイス サブピクセル エステイメーション オン エリアベイスド マッチング (Precise Sub-Pixel Estimation on Area-Based Matching)」,プロク. 8th IEEE インターナショナル コンファレンス オン コンピュータ ビジョン (ICCV2001) (Proc. 8th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV2001)), (カナダ,バンクーバー),2001年7月,p.90-97

## 【0012】

## 【非特許文献 4】

マサオ・シミズ、マサトシ・オクトミ (Masao Shimizu and Masatoshi Okutomi),「アン アナリシス オフ サブピクセル エステイメーション エラー オン エリアベイスド イメージ マッチング (An Analysis of Sub-Pixel Estimation Error on Area-Based Image Matching)」,プロク. 14th インターナショナル コンファレンス オン デジタル シグナル プロセッシング (DSP2002) (Proc. 14th International Conference on Digital Signal Processing (DSP2002)), (ギリシア,サントリーニ),2002年7月,第II巻,p.1239-1242(W3B.4)

## 【0013】

## 【非特許文献 5】

C.・クエンティン・デイビス、ゾハー・Z.・カル、デニス・M.・フリーマン (C. Quentin Davis, Zoher Z. Karu and Dennis M. Freeman),「イクイバレンス オフ サブピクセル モーション エステイメータス ベイスド オン オプティカル フロー アンド ブロック マッチング (Equivalence of subpixel motion estimators based on optical flow and block matching)」,IEEE インターナショナル シンポジウム フォー コンピュータ ビジョン1995 (IEEE Int



ernational Symposium for Computer Vision 1995), (米国フロリダ州), 1995年1月, p.7-12

## 【0014】

## 【非特許文献6】

サムソン・J.・ティモネー、デニス・M.・フリーマン(Samson J. Timoner and Dennis M. Freeman), 「マルチイメージ グラジエントベースド アルゴリズム フォー モーション エステイメーション(Multi-image gradient-based algorithms for motion estimation)」, オプティカル エンジニアリング (Optical Engineering), (米国), 2001年9月, 第40巻, 第9号, p.2003-2016

## 【0015】

## 【非特許文献7】

ジョナサン・W.・ブランド (Jonathan W. Brandt), 「インプループド アキュラシ イン グラジエントベースド オプティカル フロー エステイメーション (Improved Accuracy in gradient-based Optical Flow Estimation)」, インターナショナル ジャーナル オフ コンピュータ ビジョン (International Journal of Computer Vision), (米国), 1997年, 第25巻, 第1号, p.5-22

## 【0016】

## 【非特許文献8】

Q.・テン、M.・N.・ヒューニッス(Q. Tian and M. N. Huhns), 「アルゴリズム フォー サブピクセル レジストレイション(Algorithms for Subpixel Registration)」, コンピュータ ビジョン, グラフィックス アンド イメージ プロセッシング (Computer Vision, Graphics and Image Processing), (米国), 1986年, 第35号, p.220-233

## 【0017】

## 【非特許文献9】

ショーン・ボーマン、マーク・A.・ロバートソン、ロバート・L.・ステイブンソン(Sean Borman, Mark A. Robertson and Robert L. Stevenson), 「ブロックマッチング サブピクセル モーション エステイメーション フロム ノイズ, アンダー—サンプルド フレームス——アン エンパイリカル パフォ

ーマンス エバリュエーション(Block-Matching Sub-Pixel Motion Estimation from Noisy, Under-Sampled Frames—An Empirical Performance Evaluation)」、SPIE ビジュアル コミュニケーションズ アンド イメージ プロセッシング 1999 (SPIE Visual Communications and Image Processing 1999)、(米国カリフォルニア州)

## 【0018】

## 【発明が解決しようとする課題】

従来は、以下のように詳細に説明されるように、画像の水平方向と垂直方向を独立に補間推定していた。しかし、従来のこのような方法によると、図21に示すように、推定誤差が発生するという問題点があった。

## 【0019】

ここでは、画像を水平方向と垂直方向に独立と考え、変位のサブピクセル推定も独立に行う従来方法を「1次元推定方法」と称する。

## 【0020】

従来の1次元推定方法の問題点を説明するために、まず、画像間の水平方向変位を求める問題を考える。真の画像間変位を $(d_s, d_t)$ 、異方性を持った類似度の回転角度を $\theta_g$ とする。1次元推定方法では、離散化類似度として、 $R(-1, 0)$ 、 $R(0, 0)$ 、 $R(1, 0)$ (図21の□)を使い、下記数1によって

$$\hat{d}_s$$

(図21の●)を推定した。

## 【0021】

## 【数1】

$$\hat{d}_s = \frac{R(-1, 0) - R(1, 0)}{2R(-1, 0) - 4R(0, 0) + 2R(1, 0)}$$

仮に上記数1で直線 $t = 0$ 上の類似度最大位置を正しく推定できたとしても、図21から明らかなように、真の水平方向画像間変位 $d_s$ (図21の▲の水平成分)に対して大きな推定誤差を含んでいる。すなわち、次の条件のいずれかが真のときには、水平方向推定誤差が発生して、

$$\hat{d}_s - d_s \neq 0$$

となる。

【0022】

・垂直方向変位  $d_t \neq 0$ 。

【0023】

・2次元類似度が異方性を持つ。

【0024】

・異方性を持つ2次元類似度の回転角度  $\theta_g \neq 0$ 。

【0025】

大部分の画像が上記条件のいずれかに当てはまる。

【0026】

また、垂直方向に関しても同様である。例えば、図2(a)に示す画像中のコーナー領域のSSD自己類似度を求めると、図2(b)のようになっている。この自己類似度は異方性を持ち、 $\theta_g \neq 0$ なので、従来の1次元推定方法では、サブピクセル推定誤差が発生する可能性があることを示している。また、図5(a)に示すテクスチャ画像を使ったサブピクセル推定においても、推定誤差が発生する可能性を示している。

【0027】

また、コンピュータビジョンの分野によっては、エピソード拘束などの拘束条件を利用することで探索範囲を1次元に限定できるので、1次元信号の高精度なマッチングができれば十分な場合がある。しかしながら、2次元画像を使って、高精度な2次元変位を求める必要がある用途も多い。例えば、動き推定、動き推定による領域分割、ターゲットトラッキング、モザイクング、リモートセンシング、超解像などである。

【0028】

本発明は上述のような事情よりなされたものであり、本発明の目的は、2次元類似度を考慮することで、水平及び垂直方向の画像間変位を同時に高精度に推定できるようにした画像のサブピクセルマッチングにおける高精度2次元推定方法

を提供することにある。

#### 【0029】

##### 【課題を解決するための手段】

本発明は領域ベースマッチングを用いた2次元推定方法に関し、本発明の上記目的は、離散的に得られた画像間の類似度値を利用して、連続領域における2次元類似度最大位置を推定する画像のサブピクセルマッチングにおける高精度2次元推定方法であって、前記画像間の類似度値を使って、水平極値線HEL及び垂直極値線VELを求め、求めた前記水平極値線HELと前記垂直極値線VELの交点を前記2次元類似度最大位置のサブピクセル推定位置とすることによって達成される。

#### 【0030】

##### 【発明の実施の形態】

以下、本発明を図面及び数式を参照して説明する。本発明は、画像のサンプリング周期で求まっている類似度を使って、類似度の最大値を与える2次元サブピクセル変位を高精度に求めることを目的としている。

#### 【0031】

ここで、画像を水平方向と垂直方向に独立と考え、変位のサブピクセル推定も独立に行う従来方法を「1次元推定方法」と称するのに対して、本発明に係る推定方法は、2次元画像から計算した離散位置における類似度を使って、2次元サブピクセル推定を行なっているので、「画像のサブピクセルマッチングにおける高精度2次元推定方法」と称し、また、「2次元サブピクセル推定方法」或いは「2次元推定方法」と呼ぶこともできる。

#### 【0032】

本発明では、領域ベースマッチングを用いた高精度2次元サブピクセル推定方法を提案する。本発明に係る2次元推定方法は、従来方法と比較して計算量がわずかに増えるだけで、圧倒的に高精度な2次元サブピクセル推定が可能である。

#### 【0033】

##### (1) 2次元画像モデルと2次元類似度モデル

ここでは、何種類かの画像モデルを取りあげ、その2次元類似度を考える。異

なる画像モデルから得られる 2 次元類似度が、同じ 2 次元類似度モデルで近似できることを示す。

#### 【0034】

領域ベースマッチングとは、2 枚の画像の類似度を評価し、その最大または最小位置を 2 枚の画像間の変位として求めることである。この類似度は、通常は画像のサンプリング周期と一致して、とびとびの変位位置に対して値が得られる。画素単位でのマッチングは、これらの類似度の中から、最大値または最小値を探すことに対応する。サブピクセル推定は、これらの類似度を補間して、サブピクセルでの最大値または最小値を与えるサブピクセル変位位置を推定することである。以後の説明では、「最大または最小」を単に「最大」と表現する。SAD や SSD 類似度を使うときには「最小」、相関類似度を使うときには「最大」を意味する。

#### 【0035】

##### (1-1) コーナーモデル

まず、領域ベースマッチングとサブピクセル推定が可能な 2 次元画像モデルとして、1 次元画像モデル

##### 【数 2】

$$f(u) = 2 \int_0^u \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{image}}} e^{-\frac{\xi^2}{2\sigma_{\text{image}}^2}} d\xi$$

を単純に拡張して、下記数 3 で示すコーナー画像を考える。ここで、 $\sigma_{\text{image}}$  は濃度エッジのシャープさである。このコーナー画像を図 1(a) に示す。

#### 【0036】

##### 【数 3】

$$I_s(u, v) = f(u)f(v)$$

ただし、画像座標系を  $u-v$ 、類似度座標系（変位座標系）を  $s-t$  とする。

#### 【0037】

上記数 3 で表す画像を参照画像として、また、全く同じ画像を入力画像として 2 次元マッチングを行ったときの SSD 類似度（本発明では、SSD 類似度を「自己類似度」と称する）は、下記数 4 で求めることができる。SSD 類似度は、

値が小さいほど類似していることを示すので、この場合には暗い場所ほど類似性が高いことを示している。自己類似度は全く同じ画像を使った類似度なので、変位  $(s, t) = (0, 0)$  の位置の類似度が最も小さい。この類似度を図 1 (b) に示す。

【0038】

【数 4】

$$R(s, t) = \sum_{i, j \in W} (I_s(i, j) - I_s(i + s, j + t))^2$$

ただし、総和範囲は、任意形状の注目範囲であるが、図 1 (b) では  $11 \times 11$  の矩形領域で計算した。

【0039】

図 1 (a) では、コーナーに剪断成分が含まれない、つまり水平方向の濃度変化が垂直位置に依存しないので、2 次元画像の水平方向と垂直方向を独立に扱うことができる。このとき、上記数 4 の類似度も、水平方向と垂直方向を独立に扱うことができる。従って、サブピクセル変位位置を推定するときにも、水平方向と垂直方向を独立に扱うことができる。

【0040】

しかし、実際の画像では、必ずしも 90 度のコーナーで構成されるわけではない。例えば、建築物を地上から撮影したステレオ画像を使って 3 次元情報を再構成するときには、建築物のコーナー領域を、他方の画像との対応を求めるが、コーナーが 90 度に撮影されることはまれである (図 2 (a) 参照)。

【0041】

そこで、 $v = 0$  に濃度エッジを持つ 2 枚の 2 次元画像

【数 5】

$$I_a(u, v) = f(v)$$

$$I_b(u, v) = -f(v)$$

を、それぞれ左に  $\theta_a$ 、右に  $\theta_b$  だけ回転した画像を考える。

【0042】

## 【数6】

$$I_a(u, v) = f(-u \sin(\theta_a) + v \cos(\theta_a))$$

$$I_b(u, v) = -f(u \sin(\theta_b) + v \cos(\theta_b))$$

この  $\theta_a$ 、 $\theta_b$  を画像全体の回転角度  $\theta_g$  とコーナー角度  $\theta_c$  を使って、次のように定義する。

【0043】

## 【数7】

$$\theta_a = \theta_g + \frac{\theta_c}{2}$$

$$\theta_b = -\theta_g + \frac{\theta_c}{2}$$

このとき、 $I_a(u, v)$  と  $I_b(u, v)$  を使って表す2次元画像モデル  $I_c(u, v)$  を、下記数8で定義する。

【0044】

## 【数8】

$$\begin{aligned} I_c(u, v) &= I_a(u, v) I_b(u, v) \\ &= -f\left(-u \sin\left(\theta_g + \frac{\theta_c}{2}\right) + v \cos\left(\theta_g + \frac{\theta_c}{2}\right)\right) \\ &\quad \times f\left(u \sin\left(-\theta_g + \frac{\theta_c}{2}\right) + v \cos\left(-\theta_g + \frac{\theta_c}{2}\right)\right) \end{aligned}$$

この2次元画像モデルは、図3に示すように、画像全体の回転角度  $\theta_g$  とコーナー角度  $\theta_c$  と2次元濃度エッジのシャープさ  $\sigma_{\text{image}}$  をパラメータに持つ。 $0 \leq \theta_g \leq \pi/4$ 、 $0 < \theta_c \leq \pi/2$  の範囲を考慮する。これ以外の範囲は、画像の左右を反転することと、濃淡を反転することで表現することができる。 $\theta_g = \pi/4$ 、 $\theta_c = \pi/2$  のときには、上記数3の単純な画像モデルと同一である。図4(a)、(b)、(c)、(g)、(h)、(i)に、上記数8で表す画像モデルの例を示す。図4(d)、(e)、(f)、(j)、(k)、(l)に、図4(a)、(b)、(c)、(g)、(h)、(i)の2次元画像に対応した類似度を示す。

【0045】

## (1-2) 繰り返しテクスチャモデル

類似度に方向依存性がないとき、つまり類似度が等方性なら、サブピクセル推定を水平方向と垂直方向に独立に行っても誤差が発生しない。しかし、類似度に方向依存性があるとき（本発明では「異方性」と呼ぶ）、つまり、方向によって微分値が異なるときには、サブピクセル推定を水平方向と垂直方向に独立に行うと誤差が発生する可能性がある。

## 【0046】

上記数8で示した2次元画像モデル  $I_c(u, v)$  では、 $\theta_c \neq \pi/2$  のときに自己類似度に異方性が現れた。しかし、直感的に理解できるように、これ以外にも自己類似度に異方性を生じさせるテクスチャが存在する。この例として、図5(a)に示す画像のSSD自己類似度を図5(b)に示す。テクスチャに含まれるコーナーは  $\theta_c = \pi/2$  なのに、類似度に異方性が現れている。

## 【0047】

$\theta_c = \pi/2$  なのに自己類似度に異方性を生じさせる2次元画像モデルとして、下記数9を考える。

## 【0048】

## 【数9】

$$\begin{aligned} I_t(u, v) &= f_{1u}(\cos(\theta_g)u + \sin(\theta_g)v) f_{1v}(-\sin(\theta_g)u + \cos(\theta_g)v) \\ f_{1u}(x) &= \sin(2\pi f_u x) \\ f_{1v}(y) &= \sin(2\pi f_v y) \end{aligned}$$

上記数9の2次元画像モデル  $I_t(u, v)$  は、図6に示すように、 $u$  方向空間周波数  $f_u$ 、 $v$  方向空間周波数  $f_v$ 、画像の回転角度  $\theta_g$  をパラメータに持つ。 $0 \leq \theta_g \leq \pi/2$  の範囲を考慮する。 $f_u \neq f_v$  のときには、自己類似度に異方性を生じる。自己類似度の異方性は、テクスチャにおける空間周波数の異方性に相当する。前節で導入した2次元画像モデル  $I_c(u, v)$  は、 $\theta_c \neq \pi/2$  のときに、空間周波数の異方性が発生していると考えられることができる。

## 【0049】

この2次元画像モデルとSSD自己類似度を図7に示す。



## 【0050】

## (1-3) ガウス関数モデル

自己類似度に異方性を生じさせる2次元画像モデルとして、下記数10の2次元ガウス関数を考えることができる。

## 【0051】

## 【数10】

$$I_g(u, v) = \text{gauss}(u \cos(\theta_g) + v \sin(\theta_g), \sigma) \\ \times \text{gauss}(-u \sin(\theta_g) + v \cos(\theta_g), k\sigma) \\ \text{gauss}(x, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

ただし、図8に示すように、 $\sigma$ はガウス関数の標準偏差で、 $k$ は異方性係数( $k > 0$ )で、 $\theta_g$ は回転角度である。 $0 \leq \theta_g \leq \pi/2$ の範囲を考慮する。この2次元画像モデルとSSD自己類似度を図9に示す。

## 【0052】

## (1-4) 2次元類似度モデル

1次元サブピクセル推定と異なり、2次元サブピクセル推定では2次元画像モデルのパラメータ数が多いので、2次元画像モデルから得られるSSD類似度を直接検討することは得策ではない。ここで取り上げた画像モデルは、画像の性質の多くを含んでいるが、実際用途で扱う画像は、ここで取り上げた画像モデルを複数を組み合わせたものや、より高次の画像が存在する。

## 【0053】

そこで、以後の検討では、これまでに検討した何種類かの画像モデルを直接使わず、代わりに、これらの画像モデルから得られる2次元類似度を近似する2次元類似度モデルを検討する。2次元類似度モデルとして、下記数11で表す2次元ガウス関数を採用する。

## 【0054】

## 【数 11】

$$R_g(s, t, d_s, d_t, \sigma, k, \theta_g) = \text{gauss}((s - d_s) \cos(\theta_g) + (t - d_t) \sin(\theta_g), \sigma) \\ \times \text{gauss}(-(s - d_s) \sin(\theta_g) + (t - d_t) \cos(\theta_g), k\sigma)$$

ただし、 $(d_s, d_t)$  は画像間の真の変位で、 $\sigma$  はガウス関数の標準偏差で、 $k$  は異方性係数( $k > 0$ )で、 $\theta_g$  は回転角度である。 $0 \leq \theta_g \leq \pi/2$  の範囲を考慮する。

## 【0055】

比較のため、ここで取り上げた 2 次元画像モデルから得られる SSD 自己類似度の例と上記数 11 の類似度の例を図 10 に示す。ただし、 $(d_s, d_t) = (0, 0)$ 、 $\theta_g = 0$ 、 $k = 1$  としたときに、2 次元画像モデルから計算した離散的な自己類似度を最もよく近似するように、上記数 11 のパラメータを数値計算で求めた。

## 【0056】

以上の説明は、連続領域で行ってきたが、実際の画像データから得られる類似度は、画素単位でのサンプリングになっている。この様子を図 11 に示す。本発明に係る 2 次元推定方法は、このように離散化単位で得られた類似度を用いて、連続領域での類似度最大値を与える 2 次元変位を高精度に推定するものである。

## 【0057】

(2) 本発明に係る 2 次元推定方法

(2-1) 本発明に係る 2 次元推定方法の原理<連続領域での説明>

ここでは、前述した 2 次元類似度モデルを使って、本発明に係る 2 次元推定方法の原理を説明する。本発明は、離散化単位で得られた類似度値を使って、連続領域での類似度最大位置を高精度に推定することである。ここでは、本発明の原理を連続領域で説明する。

## 【0058】

図 12 は 2 次元類似度モデルを等高線で表示した図である。この 2 次元類似度モデルのパラメータは、 $(d_s, d_t) = (0.2, 0.4)$ 、 $\sigma = 1.0$ 、 $k = 0.7$ 、 $\theta_g = \pi/6$  である。等高線は、2 次元類似度モデルの最大値に対して、10%

から90%までレベルを示している。2次元類似度モデルの等高線は楕円になる。この楕円の中心が、2次元類似度モデルの最大値位置である。図12(a)には、2次元類似度モデルの長軸を示してあるが、この角度が回転角度 $\theta_g$ に相当する。

## 【0059】

数11の2次元類似度モデルを $s$ で偏微分して0とおくことで、図12(b)の直線 $s = at + b$ を表す関係を得ることができる。

## 【0060】

## 【数12】

$$\begin{aligned} s &= at + b \\ &= \frac{(1-k^2)\sin\theta_g\cos\theta_g}{\sin^2\theta_g + k^2\cos^2\theta_g}t + d_s - \frac{(1-k^2)\sin\theta_g\cos\theta_g}{\sin^2\theta_g + k^2\cos^2\theta_g}d_t \end{aligned}$$

考慮する条件が $k > 0$ なので、上記数12の各係数の分母 $\neq 0$ である。また、2次元類似度モデルが等方性のとき、つまり $k = 1$ のとき、上記数12は $s = d_s$ となり、推定誤差が発生しない。本発明では、この直線を水平極値線HEL (Horizontal Extremal Line)と称する。HELは図12(b)の等高線を表す楕円と水平直線との接点を通る。

## 【0061】

一方、数11の2次元類似度モデルを $t$ で偏微分して0とおくことで、図12(b)の直線 $t = As + B$ を表す関係を得ることができる。

## 【0062】

## 【数13】

$$\begin{aligned} t &= As + B \\ &= \frac{(1-k^2)\sin\theta_g\cos\theta_g}{k^2\sin^2\theta_g + \cos^2\theta_g}s + d_t - \frac{(1-k^2)\sin\theta_g\cos\theta_g}{k^2\sin^2\theta_g + \cos^2\theta_g}d_s \end{aligned}$$

数12と同様に、各係数の分母 $\neq 0$ である。また、 $k = 1$ のとき、数13は、 $t = d_t$ となり、推定誤差が発生しない。本発明では、この直線を垂直極値線VEL (Vertical Extremal Line)と称する。VELは図12(b)の等高線を表す楕円と垂直直線との接点を通る。

## 【0063】

HELとVELの交点は、数11の2次元類似度モデルを異なる方向に偏微分したときに、どちらの方向にも0になる点であり、これは2次元類似度モデルの値を最大にする位置に他ならない。実際に、この交点を計算すると、

## 【数14】

$$s = \frac{aB + b}{1 - aA} = d_s$$

$$t = \frac{Ab + B}{1 - aA} = d_t$$

となり、当然のことながら2次元類似度モデルの変位( $d_s, d_t$ )を表している。

## 【0064】

このときの分母 $\neq 0$ は、HELとVELが交点を持つための条件である。分母を計算すると、次のようになる。

## 【0065】

## 【数15】

$$1 - aA = 1 - \frac{(1 - k^2) \sin \theta_g \cos \theta_g}{\sin^2 \theta_g + k^2 \cos^2 \theta_g} \times \frac{(1 - k^2) \sin \theta_g \cos \theta_g}{k^2 \sin^2 \theta_g + \cos^2 \theta_g}$$

$$= \frac{k^2}{(\sin^2 \theta_g + k^2 \cos^2 \theta_g)(k^2 \sin^2 \theta_g + \cos^2 \theta_g)}$$

$k$ の範囲は $k > 0$ なので、この分母 $1 - aA \neq 0$ である。

## 【0066】

まとめると、2次元類似度の $s$ 方向微分と $t$ 方向微分は、HELとVELの2直線で表すことができ、この2直線の交点が2次元類似度の最大位置になっている。従って、離散化単位で得られた類似度値を使ってHELとVELを求め、その交点を計算すれば、2次元サブピクセル推定を行うことができる。

## 【0067】

(2-2) 本発明に係る2次元推定方法の実装方法<離散領域への適用>

以下では、離散的に算出された画像間の類似度値を利用して、連続領域における類似度最大位置を推定する本発明に係る2次元推定方法を具体的に説明する。

## 【0068】

まず、離散的に得られている類似度値を使って、HELを求める。HELは水平方向について類似度最大値を通る直線なので、2本以上の水平ライン上でのサブピクセル類似度最大値位置が決定すれば、HELを求めることができる。この様子を図13(a)に示す。同心楕円は2次元類似度モデルの等高線を表す。□位置で離散的に得られた類似度値を使って、直線で示すHELを求める。

## 【0069】

図13(a)において、直線  $t = 0$  上での最大類似度を与える位置を

$$(\hat{d}_{s(t=0)}, 0)$$

、変位位置  $(s, t)$  での類似度を  $R(s, t)$  とすると、

## 【数16】

$$\hat{d}_{s(t=0)} = \frac{R(-1, 0) - R(1, 0)}{2R(-1, 0) - 4R(0, 0) + 2R(1, 0)}$$

この推定結果には、前章で示したように推定誤差が含まれるが、このことについては次節で述べる。直線  $t = -1$  上と直線  $t = 1$  上での最大類似度を与える位置をそれぞれ

$$(\hat{d}_{s(t=-1)}, -1), (\hat{d}_{s(t=1)}, 1)$$

とすると、

## 【数17】

$$\hat{d}_{s(t=-1)} = \frac{R(-1 + i_{t=-1}, -1) - R(1 + i_{t=-1}, -1)}{2R(-1 + i_{t=-1}, -1) - 4R(i_{t=-1}, -1) + 2R(1 + i_{t=-1}, -1)} + i_{t=-1}$$

## 【数18】

$$\hat{d}_{s(t=1)} = \frac{R(-1 + i_{t=1}, 1) - R(1 + i_{t=1}, 1)}{2R(-1 + i_{t=1}, 1) - 4R(i_{t=1}, 1) + 2R(1 + i_{t=1}, 1)} + i_{t=1}$$

ただし、 $i_{t=-1}$ 、 $i_{t=1}$  は、直線  $t = -1$  上と直線  $t = 1$  上で最大類似度を与える整数位置オフセットである（後述する）。

## 【0070】

これら 3 点の最大類似度位置を通る直線が H E L である。実際には、画像パターンや画像に含まれるノイズや画像間の相違などのために、これら 3 点は完全には直線上には乗らない可能性があるので、最小二乗で近似直線を求める。この 3 点を最小二乗で近似する直線は、下記数 19 で求めることができる。

【0071】

【数 19】

$$s = at + b$$

$$a = \frac{1}{2} (\hat{d}_{s(t=1)} - \hat{d}_{s(t=-1)})$$

$$b = \frac{1}{3} (\hat{d}_{s(t=1)} + \hat{d}_{s(t=0)} - \hat{d}_{s(t=-1)})$$

次に、離散化単位で得られた類似度値を使って、V E L を求める。V E L は垂直方向について類似度最大値を通る直線なので、2 本以上の垂直ライン上でのサブピクセル類似度最大値位置が決定すれば、V E L を求めることができる。この様子を、図 13 (b) に示す。同心楕円は、2 次元類似度モデルの等高線を表す。  
□位置で離散化単位で得られた類似度値を使って、直線で示す V E L を求める。

【0072】

図 13 (b) において、直線  $s = 0$  上での最大類似度を与える位置を

$$(0, \hat{d}_{t(s=0)})$$

とすると、

【数 20】

$$\hat{d}_{t(s=0)} = \frac{R(0, -1) - R(0, 1)}{2R(0, -1) - 4R(0, 0) + 2R(0, 1)}$$

直線  $s = -1$  上と直線  $s = 1$  上での最大類似度を与える位置をそれぞれ

$$(-1, \hat{d}_{t(s=-1)}), (1, \hat{d}_{t(s=1)})$$

とすると、

【数 2 1】

$$\hat{d}_{t(s=-1)} = \frac{R(-1, -1 + i_{s=-1}) - R(-1, 1 + i_{s=-1})}{2R(-1, -1 + i_{s=-1}) - 4R(-1, i_{s=-1}) + 2R(-1, 1 + i_{s=-1})} + i_{s=-1}$$

【数 2 2】

$$\hat{d}_{t(s=1)} = \frac{R(1, -1 + i_{s=1}) - R(1, 1 + i_{s=1})}{2R(1, -1 + i_{s=1}) - 4R(1, i_{s=1}) + 2R(1, 1 + i_{s=1})} + i_{s=1}$$

ただし、 $i_{s=-1}$ 、 $i_{s=1}$  は、直線  $s = -1$  上と直線  $s = 1$  上で最大類似度を与える整数位置オフセットである。

【0073】

これら 3 点の最大類似度位置を通る直線が VEL である。この 3 点を最小二乗で近似する直線は、下記数 2 3 で求めることができる。

【0074】

【数 2 3】

$$t = As + B$$

$$A = \frac{1}{2} (\hat{d}_{t(s=1)} - \hat{d}_{t(s=-1)})$$

$$B = \frac{1}{3} (\hat{d}_{t(s=1)} + \hat{d}_{t(s=0)} - \hat{d}_{t(s=-1)})$$

HEL と VEL の交点、即ち、数 1 9 と数 2 3 の交点が、連続領域における 2 次元類似度最大位置のサブピクセル推定位置

$$(\tilde{d}_s, \tilde{d}_t)$$

になっている。

【0075】

【数 2 4】

$$\tilde{d}_s = \frac{aB + b}{1 - aA}$$

$$\tilde{d}_t = \frac{Ab + B}{1 - aA}$$

ところで、数 2 1、数 2 2 における直線  $t = -1$  上と直線  $t = 1$  上で最大類似度を与える整数位置オフセット  $i_{t=-1}$ 、 $i_{t=1}$  は、必ずしも 0 になる保証

はない。例えば、図 14 (b) に示すのは、 $(d_s, d_t) = (0.2, 0.4)$ 、 $\sigma = 1$ 、 $k = 0.3$ 、 $\theta_g = \pi/8$  の 2 次元類似度モデルだが、このモデルに対する H E L を求めるための、直線  $t = -1$  上の類似度最大値は  $s = -2$  付近にある。従って、

$$\hat{d}_{s(t=-1)}, \hat{d}_{s(t=1)}$$

を計算するときには、直線  $t = -1$  上と直線  $t = 1$  上で最大類似度を与える整数位置を再探索する必要がある。垂直方向についても同様で、

$$\hat{d}_{t(s=-1)}, \hat{d}_{t(s=1)}$$

を計算するときには、直線  $s = -1$  上と直線  $s = 1$  上で最大類似度を与える整数位置を再探索する必要がある。

#### 【0076】

このとき、図 14 (b) に示す  $\pm 3$  の範囲の類似度を使い、 $-2 \leq i \leq +2$  を考慮している。この探索範囲は、多数の現実的な画像をもとに決定した範囲である。もしも、2 次元類似度モデルのパラメータ範囲に制限がないとすると、このときの再探索範囲は無限になってしまう。その理由は、 $(d_s, d_t) = (0, 0)$  のとき、数 12 の H E L について、下記数 25 の  $D(k, \theta_g)$  を考えると、

#### 【数 25】

$$\begin{aligned} 2D(k, \theta_g) &= \hat{d}_{s(t=1)} - \hat{d}_{s(t=-1)} \\ &= 2a \\ &= 2 \frac{(1 - k^2) \sin \theta_g \cos \theta_g}{\sin^2 \theta_g + k^2 \cos^2 \theta_g} \end{aligned}$$

$D(k, \theta_g)$  が最大値に近づくのは、 $\theta_g \rightarrow 0$ 、 $k \rightarrow 0$  のときで、 $D(k, \theta_g) \rightarrow \cos \theta_g / \sin \theta_g \rightarrow \infty$  だからである。ところで、 $k \rightarrow 0$  のとき、2 次元類似度の異方性が無限大になり、H E L と V E L がほとんど一致する。もしもこのような 2 次元類似度を作り出す画像があったとしても、そのときには、ほとんど同一になった H E L と V E L 上で類似度最大値を検索すればよい。たとえば、数 25 で  $D(k, \theta_g) \rightarrow \infty$  のときには、V E L 上の 3 点



$$(-1, \hat{d}_{t(s=-1)}), (0, \hat{d}_{t(s=0)}), (1, \hat{d}_{t(s=1)})$$

における類似度値を求め、パラボラフィッティングを行えばよい。

#### 【0077】

従来の1次元推定では、図14(a)に示す5個の類似度値を用いてサブピクセル位置を推定していた。このとき、直線  $t=0$  上の3点の類似度(□印)を用いてサブピクセル推定を行って水平方向サブピクセル変位(●印)とした。また、直線  $s=0$  上の3点の類似度(□印)を用いてサブピクセル推定を行って垂直方向サブピクセル変位(●印)とした。図14(a)に示す2直線の交点が従来手法で求めた2次元サブピクセル推定値だが、大きな推定誤差を含むことがわかる。

#### 【0078】

これに対して本発明に係る2次元推定方法は、図14(b)に示す25個の類似度値を用いて2次元サブピクセル位置を推定する。HELとVELの交点は正確に2次元類似度のサブピクセル最大位置を通るので、推定は極めて高精度である。さらに、本発明に係る2次元推定方法の計算量の増加は、従来手法と比較してわずかである。領域ベースマッチングでは、大部分の計算時間は類似度値を計算しているが、本発明に係る2次元推定方法では既に得られている類似度値を利用するので、計算時間の増加は少ない。

#### 【0079】

(2-3) サブピクセル推定誤差低減方法との組合せ

数16から数18、数20から数22において、3位置の類似度を使ってパラボラフィッティングによってサブピクセル位置を推定するときには、推定誤差が発生する。この推定誤差は、補間画像を利用することでキャンセルすることができる。

#### 【0080】

数16から数18、数20から数22において求めているサブピクセル位置は、従来どおりの1次元推定にすぎないので、非特許文献1に記載された、推定誤差を低減できるサブピクセル推定方法(以下、本発明に係る2次元推定方法と区別するために、非特許文献1に記載されたサブピクセル推定方法を「サブピクセ

ル推定誤差低減方法」と称する)をそのまま適用することができる。ここでは簡単に適用方法を説明する。

【0081】

マッチングに使う2次元画像関数を  $I_1(u, v)$ 、 $I_2(u, v)$  とするとき、水平方向補間画像  $I_{1iu}(u, v)$  は、

【数26】

$$I_{1iu}(u, v) = \frac{1}{2} (I_1(u-1, v) + I_1(u, v))$$

と表すことができる。ただし、このときの  $(u, v)$  は整数である。水平方向補間画像  $I_{1iu}(u, v)$  は、 $I_1(u, v)$  に対して  $(0.5, 0)$  だけ変位していると考えることができる。この補間画像を使って、次に示すSSD類似度でサブピクセル推定を行うと、推定結果も  $(0.5, 0)$  だけ変位していると考えられるので、その変位を補正した推定結果は、下記数27、数28で求めることができる。

【0082】

【数27】

$$R_{iu}(s, t) = \sum_{i,j \in W} (I_{1iu}(i, j) - I_2(i+s, j+t))^2$$

【数28】

$$\hat{d}_{is(t=0)} = \frac{R_{iu}(-1, 0) - R_{iu}(1, 0)}{2R_{iu}(-1, 0) - 4R_{iu}(0, 0) + 2R_{iu}(1, 0)} - 0.5$$

数28も数16と同様に推定誤差を含むが、その位相が逆になっているので、下記数29によって推定誤差をキャンセルすることができる。

【0083】

【数29】

$$\tilde{d}_{s(t=0)} = \frac{1}{2} (\hat{d}_{s(t=0)} + \hat{d}_{is(t=0)})$$

同様に、水平ライン  $t = -1$ 、 $t = 1$  について、

## 【数 3 0】

$$\hat{d}_{is(t=-1)} = \frac{R_{iu}(-1 + i_{t=-1}, -1) - R_{iu}(1 + i_{t=-1}, -1)}{2R_{iu}(-1 + i_{t=-1}, -1) - 4R_{iu}(i_{t=-1}, -1) + 2R_{iu}(1 + i_{t=-1}, -1) + i_{t=-1} - 0.5}$$

## 【数 3 1】

$$\hat{d}_{is(t=1)} = \frac{R_{iu}(-1 + i_{t=1}, 1) - R_{iu}(1 + i_{t=1}, 1)}{2R_{iu}(-1 + i_{t=1}, 1) - 4R_{iu}(i_{t=1}, 1) + 2R_{iu}(1 + i_{t=1}, 1) + i_{t=1} - 0.5}$$

ただし、 $i_{t=-1}$ 、 $i_{t=1}$  は、直線  $t=-1$  上と直線  $t=1$  上で  $R_{iu}(s, t)$  の最大類似度を与える整数位置オフセットである。これらの値は、数 17、数 18 とは異なる可能性がある。数 3 0 と数 3 1 を使って、下記数 3 2、数 3 3 によって推定誤差をキャンセルすることができる。

## 【0084】

## 【数 3 2】

$$\bar{d}_{s(t=-1)} = \frac{1}{2} (\hat{d}_{s(t=-1)} + \hat{d}_{is(t=-1)})$$

## 【数 3 3】

$$\bar{d}_{s(t=1)} = \frac{1}{2} (\hat{d}_{s(t=1)} + \hat{d}_{is(t=1)})$$

垂直方向についても同様である。垂直方向補間画像  $I_{1iv}(u, v)$  は、

## 【数 3 4】

$$I_{1iv}(u, v) = \frac{1}{2} (I_1(u, v-1) + I_1(u, v))$$

と表すことができる。ただし、このときの  $(u, v)$  は整数である。垂直方向補間画像  $I_{1iv}(u, v)$  は、 $I_1(u, v)$  に対して  $(0, 0.5)$  だけ変位していると考えることができる。この補間画像を使って、次に示す SSD 類似度でサブピクセル推定を行うと、推定結果も  $(0, 0.5)$  だけ変位していると考えることができるので、その変位を補正した推定結果は、下記数 3 5、数 3 6 で求めることができる。

【0085】

【数35】

$$R_{iv}(s, t) = \sum_{i, j \in W} (I_{1iv}(i, j) - I_2(i + s, j + t))^2$$

【数36】

$$\hat{d}_{it(s=0)} = \frac{R_{iv}(0, -1) - R_{iv}(0, 1)}{2R_{iv}(0, -1) - 4R_{iv}(0, 0) + 2R_{iv}(0, 1)} - 0.5$$

数36も数20と同様に推定誤差を含むが、その位相が逆になっているので、下記数37によって推定誤差をキャンセルすることができる。

【0086】

【数37】

$$\tilde{d}_{t(s=0)} = \frac{1}{2} (\hat{d}_{t(s=0)} + \hat{d}_{it(s=0)})$$

同様にして、垂直ライン  $s = -1$ 、 $s = 1$  について、

【数38】

$$\hat{d}_{it(s=-1)} = \frac{R_{iv}(-1, -1 + i_{s=-1}) - R_{iv}(-1, 1 + i_{s=-1})}{2R_{iv}(-1, -1 + i_{s=-1}) - 4R_{iv}(-1, i_{s=-1}) + 2R_{iv}(-1, 1 + i_{s=-1}) + i_{s=-1} - 0.5}$$

【数39】

$$\hat{d}_{it(s=1)} = \frac{R_{iv}(1, -1 + i_{s=1}) - R_{iv}(1, 1 + i_{s=1})}{2R_{iv}(1, -1 + i_{s=1}) - 4R_{iv}(1, i_{s=1}) + 2R_{iv}(1, 1 + i_{s=1}) + i_{s=1} - 0.5}$$

ただし、 $i_{s=-1}$ 、 $i_{s=1}$  は、直線  $s = -1$  上と直線  $s = 1$  上で  $R_{iv}(s, t)$  の最大類似度を与える整数位置オフセットである。これらの値は、数21、数22とは異なる可能性がある。数38と数39を使って、下記数40、数41によって推定誤差をキャンセルすることができる。

【0087】

【数 4 0】

$$\tilde{d}_{t(s=-1)} = \frac{1}{2} (\hat{d}_{t(s=-1)} + \hat{d}_{t(s=-1)})$$

【数 4 1】

$$\tilde{d}_{t(s=1)} = \frac{1}{2} (\hat{d}_{t(s=1)} + \hat{d}_{t(s=1)})$$

数 2 9、数 3 2、数 3 3、数 3 7、数 4 0、数 4 1 で計算した各ライン上のサブピクセル推定値は、従来の 1 次元推定方法によって推定されたサブピクセル推定値と比較して、推定誤差が低減されている。サブピクセル推定誤差低減方法によって推定されたこれらの推定結果を使って、本発明に係る 2 次元推定方法で 2 次元サブピクセル推定を行うことで、より高精度な 2 次元サブピクセル推定が可能になる。

【0088】

【数 4 2】

$$\begin{aligned}\bar{d}_s &= \frac{\bar{a}\bar{B} + \bar{b}}{1 - \bar{a}\bar{A}} \\ \bar{d}_t &= \frac{\bar{A}\bar{b} + \bar{B}}{1 - \bar{a}\bar{A}} \\ \bar{a} &= \frac{1}{2} (\tilde{d}_{s(t=1)} - \tilde{d}_{s(t=-1)}) \\ \bar{b} &= \frac{1}{3} (\tilde{d}_{s(t=1)} + \tilde{d}_{s(t=0)} - \tilde{d}_{s(t=-1)}) \\ \bar{A} &= \frac{1}{2} (\tilde{d}_{t(s=1)} - \tilde{d}_{t(s=-1)}) \\ \bar{B} &= \frac{1}{3} (\tilde{d}_{t(s=1)} + \tilde{d}_{t(s=0)} - \tilde{d}_{t(s=-1)})\end{aligned}$$

補間画像は、水平方向と垂直方向にそれぞれ 1 回ずつ作ればよいので、計算量の増加は 1 次元推定と同程度である。

【0089】

(3) 推定誤差の比較

以下では、2 次元画像間の変位推定で、従来一般的に使用されている各種推定方法による推定誤差を本発明に係る 2 次元推定方法による推定誤差と比較する。

前述した 2 次元画像を使用して推定誤差を比較することで、同じ画像に対する比較を行う。

#### 【0090】

2 次元サブピクセル推定誤差は、水平方向と垂直方向の推定誤差を考える必要がある。ところが、推定誤差に影響するのは、2 次元画像が持つ 3 パラメータと画像間の 2 次元入力変位の合計 5 パラメータになるので、全てを網羅することは困難である。そこで、代表的な 2 次元画像を用いて、各方法による推定誤差を比較する。

#### 【0091】

##### (3-1) 本発明に係る 2 次元推定方法

代表的な 2 次元画像として、前述したコーナー画像を使用し、パラメータとして  $\theta_g = 0, \pi/8, \pi/4$ 、 $\theta_c = \pi/4$ 、 $\sigma_{\text{image}} = 1.0$  を考える。 $0 \leq \theta_g \leq \pi/4$  以外の 2 次元画像は、画像の左右を反転することと、濃淡を反転することで表現することができるが、実際の検討は、さらに多くの 2 次元画像、回転角度、コーナー角度を用いて行っている。他の 2 次元画像でも、2 次元類似度が同じような形になるときには、サブピクセル推定誤差は同じ傾向を示す。

#### 【0092】

サブピクセル推定誤差低減方法を適用した本発明に係る 2 次元サブピクセル推定方法における水平方向推定誤差  $\text{error}_s$  と垂直方向推定誤差  $\text{error}_t$  は、数 4 2 を使って、下記数 4 3 で表すことができる。

#### 【0093】

##### 【数 4 3】

$$\text{error}_s = \bar{d}_s - d_s$$

$$\text{error}_t = \bar{d}_t - d_t$$

サブピクセル推定誤差低減方法を適用しないときの本発明に係る 2 次元サブピクセル推定方法における水平方向推定誤差  $\text{error}_s$  と垂直方向推定誤差  $\text{error}_t$  は、数 2 4 を使って、下記数 4 4 で表すことができる。

#### 【0094】

## 【数 4 4】

$$error_s = \tilde{d}_s - d_s$$

$$error_t = \tilde{d}_t - d_t$$

$\theta_g = 0, \pi/8, \pi/4$  の 3 画像に対する数 4 3、数 4 4 の 2 次元サブピクセル推定誤差を、それぞれ図 1 5、図 1 6、図 1 7 の (c)(d)、(e)(f) に示す。(c) と (d) は、それぞれサブピクセル推定誤差低減方法を適用した本発明に係る 2 次元サブピクセル推定方法における水平方向推定誤差  $error_s$  と垂直方向推定誤差  $error_t$  を示す。(e) と (f) は、それぞれサブピクセル推定誤差低減方法を適用しないときの本発明に係る 2 次元サブピクセル推定方法における水平方向推定誤差  $error_s$  と垂直方向推定誤差  $error_t$  を示す。

## 【0095】

図 1 5 は、 $\theta_g = 0$  の画像を使った結果を示すが、このときには 2 次元類似度に異方性が生じない。図 1 6 と図 1 7 は、それぞれ  $\theta_g = \pi/8$  と  $\pi/4$  の画像を使った結果を示し、このときには 2 次元類似度に異方性が生じているにもかかわらず、サブピクセル推定誤差は極めて小さい。

## 【0096】

## (3-2) 従来の 1 次元サブピクセル推定方法

従来の 1 次元推定方法は、数 1 6 と数 2 0 で求めることができる。また、非特許文献 1 に記載されたサブピクセル推定誤差低減方法を適用した推定値は、数 2 9 と数 3 7 で求めることができる。ここでは、数 1 6 と数 2 0 を使ったときの推定誤差を比較検討する。

## 【0097】

## 【数 4 5】

$$error_s = \hat{d}_{s(t=0)} - d_s$$

$$error_t = \hat{d}_{t(s=0)} - d_t$$

$\theta_g = 0, \pi/8, \pi/4$  の 3 画像に対する上記数 4 5 のサブピクセル推定誤差を、それぞれ図 1 5、図 1 6、図 1 7 の (g)、(h) に示す。(g) と (h) は、それぞれ従来の 1 次元推定方法における水平方向推定誤差  $error_s$  と垂直方向推定誤差  $error_t$  を示す。

## 【0098】

図15は、 $\theta_g = 0$ の画像を使った結果を示すが、このときには2次元類似度に異方性が生じない。このときには、従来の1次元推定方法でも推定誤差が生じない。図16と図17は、それぞれ $\theta_g = \pi/8$ と $\pi/4$ の画像を使った結果を示し、このときには2次元類似度に異方性が生じるが、このときには大きな推定誤差が生じる。推定誤差の大きさは、異方性を持つ2次元類似度の回転角度と真の画像間変位に依存する。

## 【0099】

## (3-3) 濃度こう配法によるサブピクセル推定

濃度こう配法では、画像間における対応位置に濃度変化がないことを仮定して、水平方向移動量と垂直方向移動量の2つの未知数を含む拘束条件を画素ごとに得る。したがって、この2つの未知数はこのままでは求めることができないため、注目領域を設定し、注目領域中での拘束条件の2乗和を最小にするように、繰り返し計算によって未知数を求める。このようにして得られる変位量には画素単位という制約がなく、サブピクセル単位を得ることができる。

## 【0100】

一方、画像補間手法では、注目領域と周囲の探索領域を離散化単位よりも密に補間する。密に補間した単位で、類似度最大値を探索する。このときには、濃度こう配法と異なり、画像間の移動量に対する制限はない。

## 【0101】

この2種類のサブピクセル変位推定方法は、全く異なる実装に見え、異なる手法として扱われていたが、本質的に同一のものであることが示されている（非特許文献5を参照）。ここでは、補間画像を作るときに用いる補間関数の次数によってサブピクセル変位推定誤差が変化する様子を確認する。そこで、1次補間を利用した補間画像によるサブピクセル推定結果を、濃度こう配法による結果と見なす。さらに、高次の補間関数を利用した補間画像によるサブピクセル推定結果も検討する。

## 【0102】

## (3-4) バイリニア画像補間によるサブピクセル推定



サブピクセル変位を求める2枚の画像を  $I_1(u, v)$ 、 $I_2(u, v)$  とする。これらの画像は離散化サンプリングされているとする。すなわち、 $u, v$  は整数である。また、画像間の変位を  $(d_s, d_t)$  としたときに、 $0 \leq d_s \leq 1$ 、 $0 \leq d_t \leq 1$  とする。画像間の真の変位がこの範囲にないときには、画素単位のマッチングによって画像全体を移動する。

【0103】

バイリニア補間(2方向1次補間)を利用したサブピクセル推定値

$$(\hat{d}_s, \hat{d}_t)$$

は、下記数46で表すことができる。

【0104】

【数46】

$$\begin{aligned} (\hat{d}_s, \hat{d}_t) &= \operatorname{argmin}_{i, j \in W} (I_1(i, j) - I_{2i1}(i, j))^2 \\ I_{2i1}(i, j) &= (1 - \hat{d}_s)(1 - \hat{d}_t)I_2(i, j) + \hat{d}_s(1 - \hat{d}_t)I_2(i + 1, j) \\ &\quad + (1 - \hat{d}_s)\hat{d}_tI_2(i, j + 1) + \hat{d}_s\hat{d}_tI_2(i + 1, j + 1) \end{aligned}$$

ただし、総和範囲は任意形状の注目領域、 $\operatorname{argmin}$ は値を最小にするような

$$(\hat{d}_s, \hat{d}_t)$$

の組を求める演算を表す。

【0105】

$\theta_g = 0$ 、 $\pi/8$ 、 $\pi/4$  の3画像に対する上記数46のサブピクセル推定誤差を、それぞれ図15、図16、図17の(i)、(j)に示す。(i)と(j)は、それぞれ水平方向推定誤差  $\text{error}_s$  と垂直方向推定誤差  $\text{error}_t$  を示す。

【0106】

図15は、 $\theta_g = 0$  の画像を使った結果を示すが、このときには2次元類似度に異方性が生じない。このときには、推定誤差が生じない。図16と図17は、それぞれ  $\theta_g = \pi/8$  と  $\pi/4$  の画像を使った結果を示し、このときには2次元類似度に異方性が生じるが、このとき推定誤差が生じる。推定誤差の大きさは、

異方性を持つ 2 次元類似度の回転角度と真の画像間変位に依存する。

#### 【0107】

この推定誤差は、図 15、図 16、図 17 の(c)、(d)の結果よりも大きい。すなわち、本発明に係る 2 次元推定方法は、バイリニア補間によるサブピクセル推定方法よりも高精度に変位を推定することができる。バイリニア補間によるサブピクセル推定方法は濃度こう配法と等価なので、本発明に係る 2 次元推定方法は、濃度こう配法よりも高精度にサブピクセル変位を推定することができる。

#### 【0108】

また、濃度こう配法に相当する推定誤差は、図 15、図 16、図 17 の(g)、(h)の 1 次元推定方法の結果よりもはるかに小さい。すなわち、従来広く利用されてきた、領域ベースマッチングを画素単位で行い、サブピクセル変位は類似度を利用して 1 次元推定する手法より、濃度こう配法ははるかに高精度に 2 次元サブピクセル変位を推定することができる。このため、領域ベースマッチングよりも濃度こう配法の方が高精度という認識があったが、本発明に係る 2 次元推定方法を用いることで、濃度こう配法よりもさらに高精度にサブピクセル変位を推定することができる。

#### 【0109】

(3—5) バイキュービック画像補間によるサブピクセル推定

補間画像を作るときに、より高次の項まで考慮することで、高精度な補間画像を作ることができる。バイキュービック補間(2 方向 3 次補間)は、補間したいサブピクセル画素位置の周囲  $4 \times 4$  の画素値を使う補間方法である。バイキュービック補間を利用したサブピクセル推定値

$$(\hat{d}_s, \hat{d}_t)$$

は、下記数 47 で表すことができる。

#### 【0110】

【数 4 7】

$$\begin{aligned}
 (\hat{d}_s, \hat{d}_t) &= \operatorname{argmin} \sum_{i,j \in W} (I_1(i, j) - I_{2i3}(i, j))^2 \\
 I_{2i3}(i, j) &= \begin{bmatrix} h_{y1} & h_{y2} & h_{y3} & h_{y4} \end{bmatrix} \\
 &\quad \times \begin{bmatrix} I_2(i-1, j-1) & I_2(i, j-1) & I_2(i+1, j-1) & I_2(i+2, j-1) \\ I_2(i-1, j) & I_2(i, j) & I_2(i+1, j) & I_2(i+2, j) \\ I_2(i-1, j+1) & I_2(i, j+1) & I_2(i+1, j+1) & I_2(i+2, j+1) \\ I_2(i-1, j+2) & I_2(i, j+2) & I_2(i+1, j+2) & I_2(i+2, j+2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{x1} \\ h_{x2} \\ h_{x3} \\ h_{x4} \end{bmatrix} \\
 h_{x1} &= h(-1 - \hat{d}_s) \\
 h_{x2} &= h(0 - \hat{d}_s) \\
 h_{x3} &= h(1 - \hat{d}_s) \\
 h_{x4} &= h(2 - \hat{d}_s) \\
 h_{y1} &= h(-1 - \hat{d}_t) \\
 h_{y2} &= h(0 - \hat{d}_t) \\
 h_{y3} &= h(1 - \hat{d}_t) \\
 h_{y4} &= h(2 - \hat{d}_t)
 \end{aligned}$$

ただし、総和範囲は任意形状の注目領域、argminは値を最小にするような

$$(\hat{d}_s, \hat{d}_t)$$

の組を求める演算を表す。このとき、重み関数  $h(x)$  は、sinc関数をもとに各種提案されていて、下記数 4 8 が多く用いられている。

【0 1 1 1】

【数 4 8】

$$h(x) = \begin{cases} (a+2)|x|^3 - (a+3)|x|^2 + 1 & (\text{if } |x| \leq 1) \\ a|x|^3 - 5a|x|^2 + 8a|x| - 4a & (\text{if } 1 < |x| \leq 2) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

ただし、 $a$  は調整パラメータで、 $a = -1$  や  $a = -0.5$  がよく用いられる。

【0 1 1 2】

また、下記数 4 9 も多く用いられる。

【0 1 1 3】

## 【数 4 9】

$$h(x) = \begin{cases} (12 - 9B - 6C)|x|^3 + (-18 + 12B + 6C)|x|^2 + (6 - 2B) & (\text{if } |x| \leq 1) \\ (-B - 6C)|x|^3 + (6B + 30C)|x|^2 + (-12B - 48C)|x| + (8B + 24C) & (\text{if } 1 < |x| \leq 2) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

B、Cは調整パラメータで、 $B=1$ 、 $C=0$ のときにはキュービックBスプラインを近似し、 $B=0$ 、 $C=0.5$ のときにはCatmull-Romキュービック特性になる。このように、重み係数の選び方によって補間特性が異なる。ここでは、数48の重み関数において、パラメータ  $a=-0.55$  を採用した。ただし、画像処理の教科書等に最も多く紹介されているのは  $a=-1$  である。両者の特性の差については後述するが、 $a=-0.55$  はサブピクセル推定誤差を小さくするように数値的に決定した。

## 【0114】

$\theta_g = 0, \pi/8, \pi/4$  の3画像に対する数47のサブピクセル推定誤差を、それぞれ図15、図16、図17の(k)、(l)に示す。(k)と(l)は、それぞれ水平方向推定誤差  $\text{error}_s$  と垂直方向推定誤差  $\text{error}_t$  を示す。

## 【0115】

図15は、 $\theta_g = 0$  の画像を使った結果を示すが、このときには2次元類似度に異方性が生じない。このときには、推定誤差が生じない。図16と図17は、それぞれ  $\theta_g = \pi/8$  と  $\pi/4$  の画像を使った結果を示し、このときには2次元類似度に異方性が生じるが、このとき推定誤差が生じる。推定誤差の大きさは、異方性を持つ2次元類似度の回転角度と真の画像間変位に依存する。

## 【0116】

この推定誤差は、図15、図16、図17の2次元推定(c)、(d)の結果と同程度である。すなわち、本発明に係る2次元サブピクセル推定方法は、最適なパラメータを選択したときの高次補間画像を使ったサブピクセル推定と同程度の高精度であるといえることができる。

## 【0117】

ところで、数48におけるパラメータ  $a$  について、具体的な計算例を示して説明する。数48は、sinc関数を有限範囲で近似した重み係数と考えることができる。パラメータ  $a$  は、その近似特性を調節するものである。図18(a)、(b)に、 $a = -0.55$  のときの  $h(x)$  と、整数位置に値を持つ1次元関数  $f(i)$  の補間結果を示す。 $f(i)$  は、数2で  $\sigma_{\text{image}} = 0.7$  としたものである。また、図18(c)、(d)に、 $a = -1.0$  のときの  $h(x)$  と、整数位置に値を持つ1次元関数  $f(i)$  の補間結果を示す。

#### 【0118】

$a = -1.0$  は、多くの画像処理の教科書などでバイキュービック補間として紹介されるパラメータである。sinc関数を良く近似しているが、少なくともここで検討した関数  $f(i)$  を良好に補間しているとは言い難い。 $a = -0.55$  は、sinc関数の近似としてはそれほど良くないが、関数  $f(i)$  を良好に補間している。

#### 【0119】

図15から図17では、パラメータ  $a = -0.55$  を用いたが、この値はサブピクセル推定誤差を小さくするように数値的に求めた結果である。 $a = -0.5$  を用いるとバイリニア補間の結果と同程度、 $a = -1.0$  を用いるとバイリニア補間を用いたサブピクセル推定結果よりも誤差が大きくなる。

#### 【0120】

##### (3-6) 推定誤差の総合比較

以下では、2次元画像のパラメータをより広範囲に変更して、各手法のサブピクセル推定誤差を比較検討する。2次元画像は、前述したコーナー画像を使用する。考慮するパラメータとして、回転角度を  $\theta_g = 0, \pi/16, 2\pi/16, 3\pi/16, 4\pi/16$ 、コーナー角度を  $\theta_c = \pi/4, \pi/3$  を考える。合計10種類の2次元画像に対する推定誤差を検討する。また、 $\sigma_{\text{image}} = 1.0$  を考える。

#### 【0121】

画像間変位は、 $-0.5 \leq d_s \leq +0.5$ 、 $-0.5 \leq d_t \leq +0.5$  の範囲で、0.1[画素]ごとに与える。このとき、2次元推定誤差の大きさ、

$$\sqrt{(\hat{d}_s - d_s)^2 + (\hat{d}_t - d_t)^2}$$

の RMS 誤差を評価した。

### 【0122】

評価したサブピクセル推定方法は、前述した各方法の他に、従来の 1 次元推定方法に対するサブピクセル推定誤差低減方法を適用した推定結果も評価した。したがって、

- ・サブピクセル推定誤差低減方法を用いた 2 次元推定 (2D-EEC)
- ・サブピクセル推定誤差低減方法を用いない 2 次元推定 (2D)
- ・サブピクセル推定誤差低減方法を用いた 1 次元推定 (1D-EEC)
- ・サブピクセル推定誤差低減方法を用いない 1 次元推定 (1D)
- ・バイリニア補間を用いた 2 次元推定 (Bi-Linear)
- ・バイキュービック補間を用いた 2 次元推定 ( $a = -0.55$ ) (Bi-Cubic)

の 6 種類の推定方法の推定誤差を評価した。評価した結果を表 1 に示す。

### 【0123】

【表 1】

方法	$\theta_g[\text{rad}]$	0	$\pi/16$	$2\pi/16$	$3\pi/16$	$4\pi/16$	合計
	$\theta_c[\text{rad}]$						
2D-EEC	$\pi/4$	0.001322	0.000969	0.002766	0.001963	0.000994	0.001638
	$\pi/3$	0.000990	0.002325	0.001388	0.001109	0.001457	
2D	$\pi/4$	0.009593	0.009411	0.014590	0.010839	0.003346	0.008153
	$\pi/3$	0.007485	0.006722	0.004023	0.003286	0.003787	
1D-EEC	$\pi/4$	0.001341	0.297529	0.343263	0.324090	0.315181	0.242521
	$\pi/3$	0.001005	0.171184	0.218847	0.223680	0.224063	
1D	$\pi/4$	0.009715	0.297533	0.343867	0.325014	0.316467	0.243197
	$\pi/3$	0.007583	0.172383	0.219518	0.224272	0.224803	
Bi-Linear	$\pi/4$	0.009869	0.009800	0.010813	0.008352	0.007566	0.008746
	$\pi/3$	0.007679	0.008859	0.008360	0.007766	0.007614	
Bi-Cubic	$\pi/4$	0.006425	0.006153	0.004761	0.002894	0.000843	0.003979
	$\pi/3$	0.004243	0.003878	0.003158	0.001924	0.000829	

この結果から、次の内容を読みとることができる。

## 【0124】

・サブピクセル推定誤差低減方法を用いた1次元推定(1D-EEC)は、回転角度  $\theta_g = 0$  のときには、従来の1次元推定(1D)に対して推定誤差を低減できる。しかし、回転角度  $\theta_g \neq 0$  のときには差が現れない。回転角度  $\theta_g$  は、異方性がある類似度の回転角度に対応する。

## 【0125】

・バイリニア補間(Bilinear)やバイキュービック補間(Bicubic)を用いた2次元推定は、1次元推定(1D)に対して推定誤差が2桁程度小さい。この差は歴然である。バイリニア補間(Bilinear)を用いた2次元推定は、濃度こう配法に対応する。濃度こう配法が高精度にサブピクセル推定ができると考えられてきた理由はここにある。

## 【0126】

・バイキュービック補間(Bicubic)を用いた2次元推定は、バイリニア補間(Bilinear)を用いた2次元推定よりも高精度である。しかし、重み関数のパラメータによって結果は異なる。重み関数のパラメータを調整することとは、補間フィルタの特性を調整することに対応する。すなわち、画像に対して適切な補間フィルタを選択することで、画像補間を用いたサブピクセル推定手法では精度を向上することができる。

## 【0127】

・サブピクセル推定誤差低減方法を用いた2次元推定(2D-EEC)は、バイキュービック補間(Bicubic)を用いた2次元推定よりも推定誤差が小さい。しかも、パラメータ調整の必要がない。サブピクセル推定誤差低減方法を用いた2次元推定(2D-EEC)は、サブピクセル推定誤差低減方法を用いない2次元推定(2D)よりも計算コストが大きい。そこで、計算コストを重視して推定結果は濃度こう配法と同程度でよいときにはサブピクセル推定誤差低減方法を用いない2次元推定(2D)を利用し、さらに高精度な推定結果を得たいときにはサブピクセル推定誤差低減方法を用いた2次元推定(2D-EEC)を利用する、という使い分けも可能である。

## 【0128】

#### (4) 実験

##### (4-1) 合成画像を使った実験

前述したコーナー画像を作り、本発明に係る 2 次元推定方法を実装したプログラムを使って 2 次元サブピクセル推定を行った。

##### 【0129】

作成した合成画像は、8bitモノクロ画像で、画像サイズが  $64 \times 64$  [画素] で、注目範囲が  $11 \times 11$  [画素] である。画像にノイズは含まれない。画像のパラメータは、 $\sigma_{\text{image}} = 1.0$ 、コーナー角度  $\theta_c = \pi/4$ 、回転角度  $\theta_g = 0, \pi/8, \pi/4$  である。画像間変位は、 $-0.5 \leq d_s \leq +0.5$ 、 $-0.5 \leq d_t \leq +0.5$  の範囲で、0.1 [画素] ごとに与えた。

##### 【0130】

図 19 に従来の 1 次元推定と、サブピクセル推定誤差低減方法を適用した本発明に係る 2 次元推定についての結果を示す。図 19 において、計算結果をメッシュで、実験結果を●で表す。実験結果と計算結果との相違の原因は、画像が 8bit 量子化階調 (256 階調) であることが考えられる。また、大きく段差がある部分は、整数での最大類似度を探索した結果が隣の画素位置に移動してしまったためと考えることができる。このように隣の位置に移動してしまうことは、従来の 1 次元推定方法の根本的な欠点である。

##### 【0131】

##### (4-2) 実画像を使った実験

マッチングに利用する画像から得られる 2 次元類似度の回転角度  $\theta_g \doteq 0$  のときには、従来の 1 次元推定方法でも推定誤差は発生しないが、 $\theta_g \neq 0$  のときには、大きな推定誤差が生じる可能性がある。そこで、マッチングパターンとして、2 種類のパターンを用いたターゲットトラッキング実験を行った。

##### 【0132】

使用したマッチングパターンは、円形パターンと傾いたエッジパターンである。これらのパターンを図 20 (a)、(e) に示す。円形パターンの大きさは、直径が約 4.1 [画素] である。また、これらのパターンの SSD 自己類似度を図 20 (b)、(f) に示す。



## 【0133】

円形パターンの自己類似度は等方性なので、従来の1次元推定方法と本発明に係る2次元推定方法のどちらでも、推定誤差が小さいことが予想できる。一方、傾いたエッジパターンに対応する自己類似度は異方性でかつ傾いているので、従来の1次元推定方法では推定誤差が大きく、本発明に係る2次元推定方法では推定誤差が小さいことが予想できる。

## 【0134】

マッチングパターンを厚紙に印刷して、トラッキングターゲットとした。ターゲットは、ネジ送り式リニアステージ上を直線的に移動する。ターゲットの移動を約250枚の時系列画像で撮影し、最初の画像を参照パターンとして使い、以後の画像中からターゲットをトラッキングした。注目領域サイズは $60 \times 60$ 〔画素〕(図20(a)、(e)中の黒い矩形領域)で、探索領域は移動予測位置に対して $\pm 8$ ( $17 \times 17$ )である。ターゲットは画像上で右下方向にゆっくり移動する。マッチングが正しくでき、サブピクセル推定に誤差がなければ、計測軌跡は直線になる。従来の1次元推定方法と本発明に係る2次元推定方法のどちらにもSSD自己類似度を使用し、サブピクセル推定誤差低減方法を適用したパラボラフィッティングによるサブピクセル推定を行った。

## 【0135】

図20(c)、(d)に、トラッキングパターンとして円形パターン使ったときの計測結果を示す。図20(c)は従来の1次元推定方法、図20(d)は本発明に係る2次元推定方法を使った結果である。どちらの場合も、サブピクセル推定誤差が小さく、軌跡は良好な直線になっている。

## 【0136】

図20(g)、(h)に、トラッキングパターンとして傾いたエッジパターン使ったときの計測結果を示す。図20(g)は従来の1次元推定方法、(h)は本発明に係る2次元推定方法を使った結果である。従来の1次元推定方法では、非常に大きなサブピクセル推定誤差が発生していることが明らかである。

## 【0137】

本発明に係る2次元推定方法では、トラッキングパターンによらず推定誤差が

小さいが、円形パターンのときよりも計測軌跡が直線から外れている。この理由は、2次元類似度が2次元ガウスモデルと異なるため、HELとVELを直線近似するときに誤差が含まれることが原因と考えられる。

#### 【0138】

現実的には、このようなトラッキングパターンを利用することはまれである。

#### 【0139】

しかし、この実験は、従来の1次元推定方法を使うと、マッチングパターンによっては、予想外に大きなサブピクセル推定誤差が発生する可能性があることを示している。この実験では、対象が直線上を移動していることがわかっているので、サブピクセル推定誤差を確認することができた。しかし、たとえば、異なる方向から撮影した複数の画像を使って、建築物の3次元情報を再構築するときなどには、傾いたエッジパターンの領域をマッチング領域として利用することもある。従来の1次元推定方法では、このようなときに大きな推定誤差が発生するという問題点があった。

#### 【0140】

なお、本発明における水平極値線HELと垂直極値線VELを求める際、3点を最小二乗で近似する直線を求める代わりに、3点を通る2次曲線として求めることにより、直線近似による誤差を低減するように本発明に係る2次元推定方法を拡張することもできる。

#### 【0141】

さらに、本発明に係る2次元推定方法を多次元パラメータ推定に拡張することができる。この多次元拡張方法を用いると、回転やスケール変化を伴う画像間のマッチングが可能になる。

#### 【0142】

#### 【発明の効果】

本発明に係る2次元推定方法は、2次元類似度を考慮することで、水平及び垂直方向の画像間変位を同時に高精度に推定するものである。本発明は、2次元移動量のみならず、回転やサイズの違い等を高精度に推定する方法にも応用できる。本発明を色々な画像処理分野に適用することにより、以下のような優れた効果

を奏する。

#### 【0143】

例えば、リモートセンシングや航空写真を使った地図作製では、複数の画像をつなぎ合わせることで、つまりモザイクングを行うことが多い。このとき、画像間の対応位置を求めるために、領域ベースのマッチングを行う。このときには、対応が正しいことはもちろん、対応が画素単位より細かな分解能で求まることが重要になる。さらに、多数の画像を利用して対応を求めるので、計算の高速性も重要である。領域ベースマッチングを使って画素分解能以上の対応を求めるときには、画素単位のとびとびの位置で求まる類似度評価値を使って、フィッティング関数によるサブピクセル推定を行っているが、このときに本発明を適用することで、計算時間の増加がわずかで、はるかに高精度な対応位置を求めることができる。

#### 【0144】

特に、画像パターンに斜め成分が含まれるとき、つまり、地図作製などで道路交差点などのパターンが画像座標系に対して傾いて撮影されているときに、本発明の効果が一層発揮される。

#### 【0145】

また、ステレオビジョンでは、複数枚の画像間の対応位置を求めることが基本的な処理であり、このときの対応位置精度が最終的な結果精度に大きく影響を及ぼす。画像間の対応位置を求めるときには、エピポーラ拘束などの拘束条件を利用するが、エピポーラ拘束条件自体を求めるときにも画像間の対応を調べる必要があり、このときにはエピポーラ拘束を利用できない。従って、本発明を適用することによって、高精度にエピポーラ拘束条件を求めることが可能になるため、結果として高精度なステレオ処理を行うことができるようになる。

#### 【0146】

さらに、MPEG圧縮を行うときには、隣接フレーム間の対応位置を正確に求めることが、高品質で高圧縮率を達成するために必要である。隣接フレーム間の対応位置は、通常は1/2画素単位で求めるが、このときにはSADやSSD類似度評価値を利用した1次元の簡易手法を利用しているため、大きな誤差が含ま

れている可能性が在る。ところが、本発明に係る 2 次元推定方法は、従来の 1 次元推定方法に対してわずかな計算量の増加で、より確実に高精度な画像間の対応を求めることができるため、MPEG 画像生成の圧縮率を向上することが可能になる。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【図 1】

2 次元画像モデルとその 2 次元類似度を示す図である。(a) は  $\sigma_{\text{image}} = 0.7$  の画像モデルを示し、画像のサイズは  $11 \times 11$  [画素] である。(b) は画像モデルの自己類似度を示し、類似度の範囲は  $11 \times 11$  である。(s, t) の暗い位置は高い類似度を有する 2 枚の画像の変位に対応する。最も暗い位置の (s, t) は、自己類似度の性質で (0, 0) になる。

#### 【図 2】

3 次元再構成アプリケーション用に一般的に使用される画像例 (a) とその自己類似度 (b) を示す図である。自己類似度マップは、自己類似度マップが  $k \neq 1$  及び  $\theta_g \neq 0$  の性質を有しているので、従来の 1 次元推定方法を用いることでサブピクセル推定誤差が生じることを示している。

#### 【図 3】

画像全体の回転角度  $\theta_g$  とコーナー角度  $\theta_c$  を有する 2 次元コーナー画像モデルを示す図である。

#### 【図 4】

2 次元コーナー画像モデルとその 2 次元自己類似度を示す図である。(a)、(b)、(c) は、 $\theta_c = \pi/2$ 、 $\sigma_{\text{image}} = 1$  の画像モデルで、それぞれ  $\theta_g = 0$ 、 $\pi/8$ 、 $\pi/4$  である。(d)、(e)、(f) は、それぞれ (a)、(b)、(c) に対応する類似度である。(g)、(h)、(i) は、 $\theta_c = \pi/4$ 、 $\sigma_{\text{image}} = 1$  の画像モデルで、それぞれ  $\theta_g = 0$ 、 $\pi/8$ 、 $\pi/4$  である。(j)、(k)、(l) は、それぞれ (g)、(h)、(i) に対応する類似度である。

#### 【図 5】

$\theta_c = \pi/2$  を有するテクスチャ画像例とその自己類似度を示す図である。

#### 【図 6】

画像全体の回転角度  $\theta_g$  と水平方向空間周波数  $f_u$  と垂直方向空間周波数  $f_v$  を有する 2 次元繰り返しテクスチャ画像モデルを示す図である。

【図 7】

2 次元繰り返しテクスチャ画像モデルとその 2 次元自己類似度を示す図である。(a)、(b)、(c)は、 $f_u = 0.1$ 、 $f_v = 0.1$ の画像モデルで、それぞれ  $\theta_g = 0$ 、 $\pi/8$ 、 $\pi/4$ である。(d)、(e)、(f)は、それぞれ(a)、(b)、(c)に対応する類似度である。(g)、(h)、(i)は、 $f_u = 0.05$ 、 $f_v = 0.1$ の画像モデルで、それぞれ  $\theta_g = 0$ 、 $\pi/8$ 、 $\pi/4$ である。(j)、(k)、(l)は、それぞれ(g)、(h)、(i)に対応する類似度である。自己類似度は一定の変位を有する 2 枚同様な画像から得られる。画像のサイズは  $11 \times 11$  [画素]で、類似度の範囲は -5 から 5 までである。

【図 8】

画像全体の回転角度  $\theta_g$  と水平標準偏差  $\sigma$  と垂直標準偏差  $k\sigma$  を有する 2 次元ガウス画像モデルを示す図である。

【図 9】

2 次元ガウス画像モデルとその 2 次元自己類似度を示す図である。(a)、(b)、(c)は、 $\sigma = 2$ 、 $k = 1$ の画像モデルで、それぞれ  $\theta_g = 0$ 、 $\pi/8$ 、 $\pi/4$ である。(d)、(e)、(f)は、それぞれ(a)、(b)、(c)に対応する類似度である。(g)、(h)、(i)は、 $\sigma = 2$ 、 $k = 0.5$ の画像モデルで、それぞれ  $\theta_g = 0$ 、 $\pi/8$ 、 $\pi/4$ である。(j)、(k)、(l)は、それぞれ(g)、(h)、(i)に対応する類似度である。自己類似度は一定の変位を有する 2 枚同様な画像から得られる。画像のサイズは  $11 \times 11$  [画素]で、類似度の範囲は -5 から 5 までである。

【図 10】

3 種類異なった 2 次元画像モデルと、それらの 2 次元自己類似度と、2 次元類似度モデルに比較して 2 次元自己類似度の部分図を示す図である。(a)は  $\theta_c = \pi/4$ 、 $\sigma_{\text{image}} = 1$ 、 $\theta_g = 0$ を有する 2 次元コーナー画像モデルを示す。(b)は  $f_u = 0.051$ 、 $f_v = 0.1$ 、 $\theta_g = 0$ を有する 2 次元繰り返しテクスチャ画像モデルを示す。(c)は  $\sigma = 2$ 、 $k = 0.5$ 、 $\theta_g = 0$ を有する 2 次元ガウ

ス画像モデルを示す。(d)、(e)、(f)は、それぞれ(a)、(b)、(c)に対応する類似度である。(g)、(h)、(i)は、整数位置(○で表す)でサンプリングされた(d)、(e)、(f)の  $t=0$  の水平部分図と、2次元類似度モデル(点線で表す)を示す。

**【図 1 1】**

2次元連続的に類似度計算と離散的に類似度計算の例を示す図である。

**【図 1 2】**

$(d_s, d_t) = (0.2, 0.4)$ 、 $\sigma = 1$ 、 $k = 0.7$ 、 $\theta_g = \pi/6$ を有する2次元類似度モデルを示す図である。等高線は関数値の10%から90%までに対応している。(a)において、2次元類似度モデルの長軸が $\theta_g = \pi/6$ を示す。(b)において、HEL (水平極値線)とVEL (垂直極値線)の両方が2次元類似度モデル $(d_s, d_t)$ のピーク値位置を通るが、2次元類似度モデルの長軸或いは短軸と異なる。

**【図 1 3】**

HELとVELの推定プロセスを説明するための図である。(a)において、●は3本の水平線  $t = -1$ 、 $t = 0$ 、 $t = 1$ 上の類似度値(□)から得られた推定サブピクセル位置を示し、HELは最小二乗で3つ●の位置から推定されることが可能である。(b)において、VELは同様なプロセスで推定されることが可能である。

**【図 1 4】**

従来の1次元推定方法及び本発明に係る2次元推定方法にそれぞれ必要な類似度値の位置を示す図である。2次元類似度モデルは $(d_s, d_t) = (0.2, 0.4)$ 、 $\sigma = 1$ 、 $k = 0.3$ 、 $\theta_g = \pi/8$ を有する。

**【図 1 5】**

推定誤差を比較するための図である。(a)は比較用に使用される画像モデルで、即ち、 $\theta_g = 0$ 、 $\theta_c = \pi/4$ 、 $\sigma_{\text{image}} = 1.0$ の2次元コーナーモデルである。(b)は(a)の画像モデルの自己類似度を示す。

**【図 1 6】**

推定誤差を比較するための図である。(a)は比較用に使用される画像モデルで

、即ち、 $\theta_g = \pi/8$ 、 $\theta_c = \pi/4$ 、 $\sigma_{\text{image}} = 1.0$  の 2 次元コーナーモデルである。(b) は (a) の画像モデルの自己類似度を示す。

【図 17】

推定誤差を比較するための図である。(a) は比較用に使用される画像モデルで、即ち、 $\theta_g = \pi/4$ 、 $\theta_c = \pi/4$ 、 $\sigma_{\text{image}} = 1.0$  の 2 次元コーナーモデルである。(b) は (a) の画像モデルの自己類似度を示す。

【図 18】

重み関数とパラメータに依存する補間特性を説明するための図である。

【図 19】

合成画像を使った実験結果を示す図である。

【図 20】

実画像を使ったターゲットトラッキング実験結果を示す図である。

【図 21】

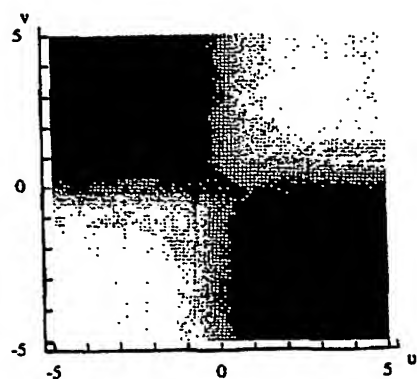
従来の 1 次元サブピクセル推定方法を説明するための図である。

$$\hat{d}_s$$

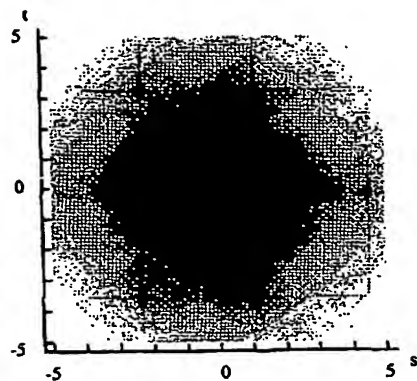
は、 $s = -1, 0, 1$  での 3 つの類似度の値を用いた従来の 1 次元サブピクセル推定方法によって推定された位置で、 $d_t \neq 0$  及び  $\theta_g \neq 0$  の際に、この推定値は真のピーク位置に対して誤差を有する。

【書類名】 図面

【図 1】

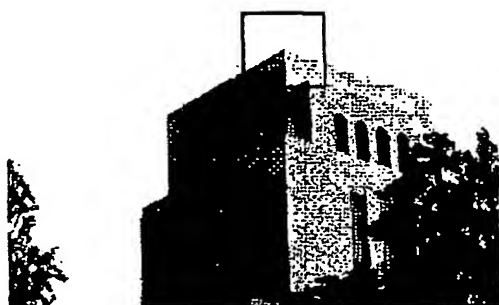


(a) 2次元画像濃度

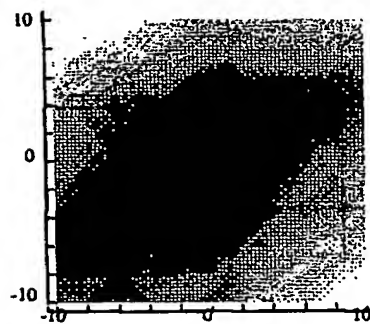


(b) 2次元類似度

【図 2】



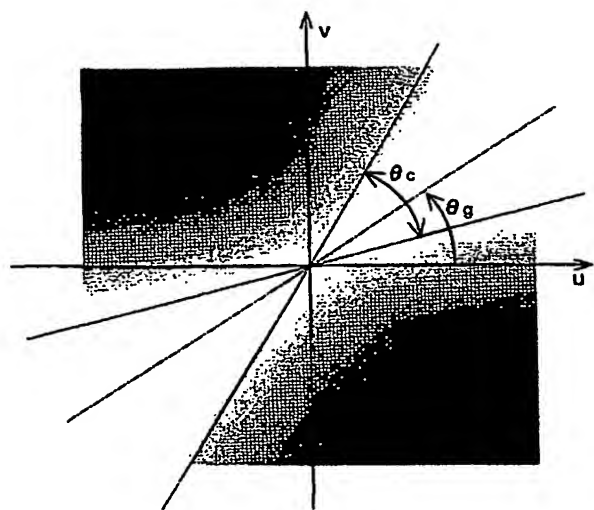
(a) 画像



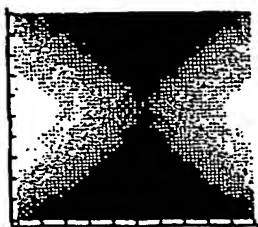
(b) (a)の自己類似度



【図 3】



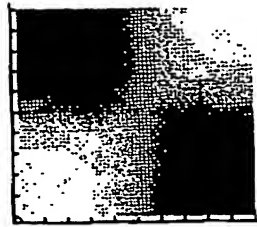
【図 4】



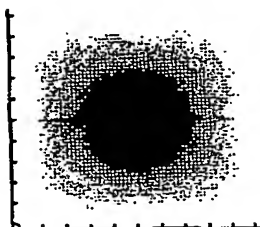
(a)  $\theta_c = \pi/2, \theta_g = 0$



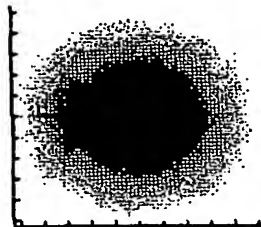
(b)  $\theta_c = \pi/2, \theta_g = \pi/8$



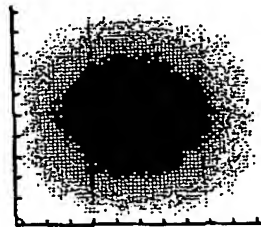
(c)  $\theta_c = \pi/2, \theta_g = \pi/4$



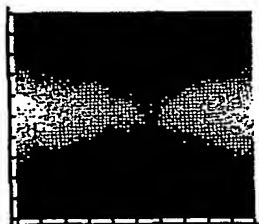
(d) (a) の類似度



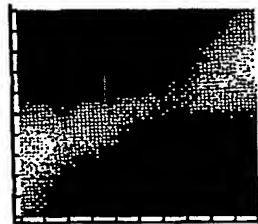
(e) (b) の類似度



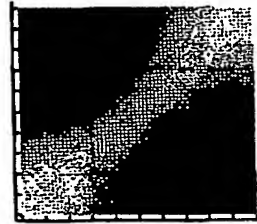
(f) (c) の類似度



(g)  $\theta_c = \pi/4, \theta_g = 0$



(h)  $\theta_c = \pi/4, \theta_g = \pi/8$



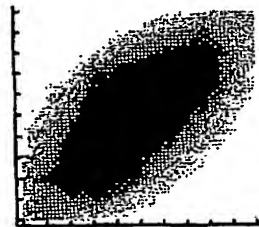
(i)  $\theta_c = \pi/4, \theta_g = \pi/4$



(j) (g) の類似度

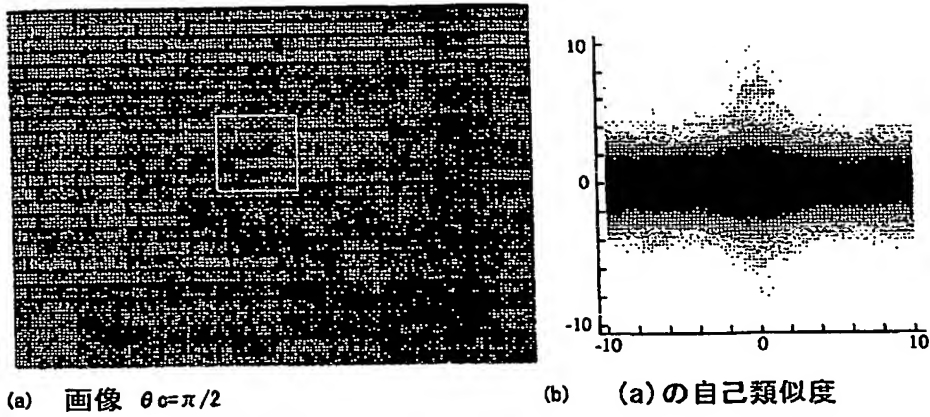


(k) (h) の類似度

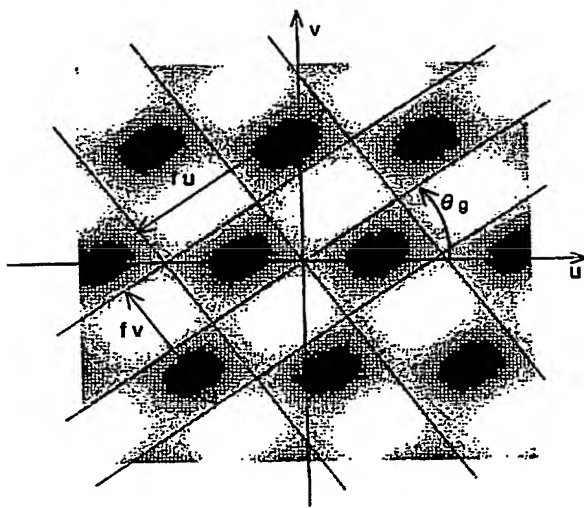


(l) (i) の類似度

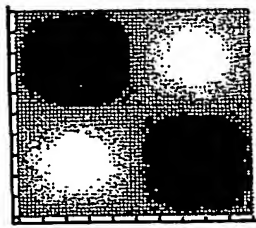
【図 5】



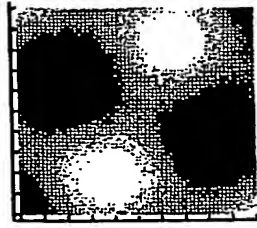
【図 6】



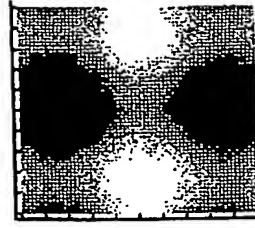
【図 7】



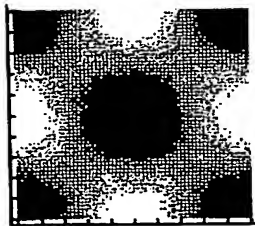
(a)  $f_u=0.1, f_v=0.1, \theta_g=0$



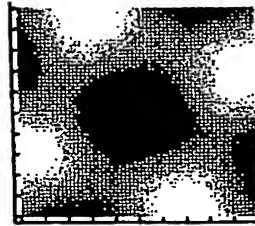
(b)  $f_u=0.1, f_v=0.1, \theta_g=\pi/8$



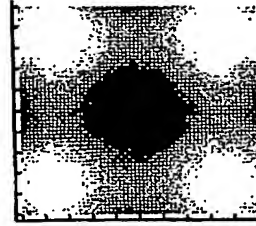
(c)  $f_u=0.1, f_v=0.1, \theta_g=\pi/4$



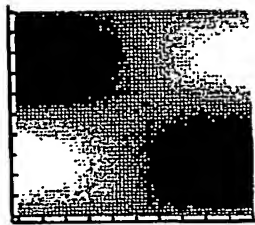
(d) (a) の類似度



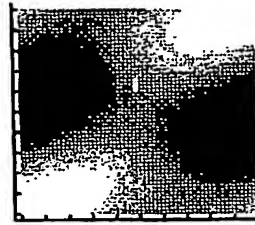
(e) (b) の類似度



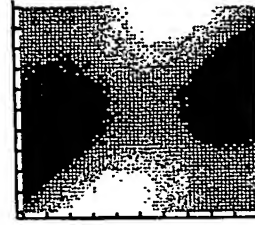
(f) (c) の類似度



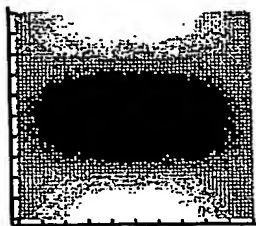
(g)  $f_u=0.05, f_v=0.1, \theta_g=0$



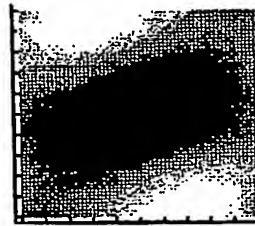
(h)  $f_u=0.05, f_v=0.1, \theta_g=\pi/8$



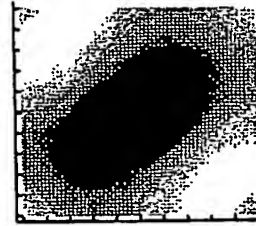
(i)  $f_u=0.05, f_v=0.1, \theta_g=\pi/4$



(j) (g) の類似度

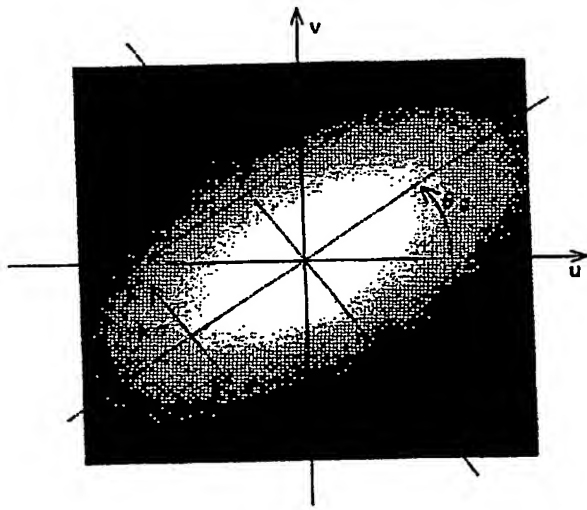


(k) (h) の類似度

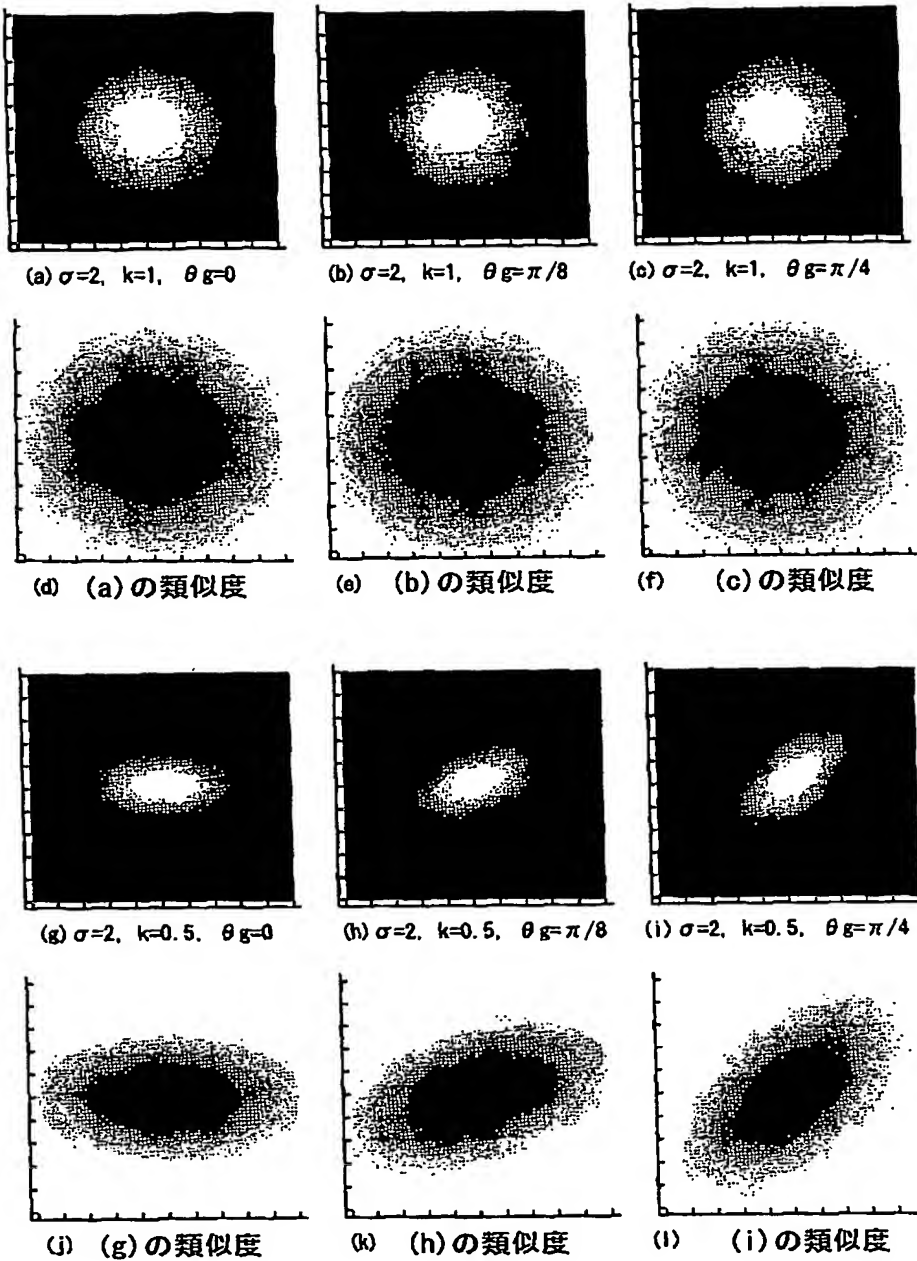


(l) (i) の類似度

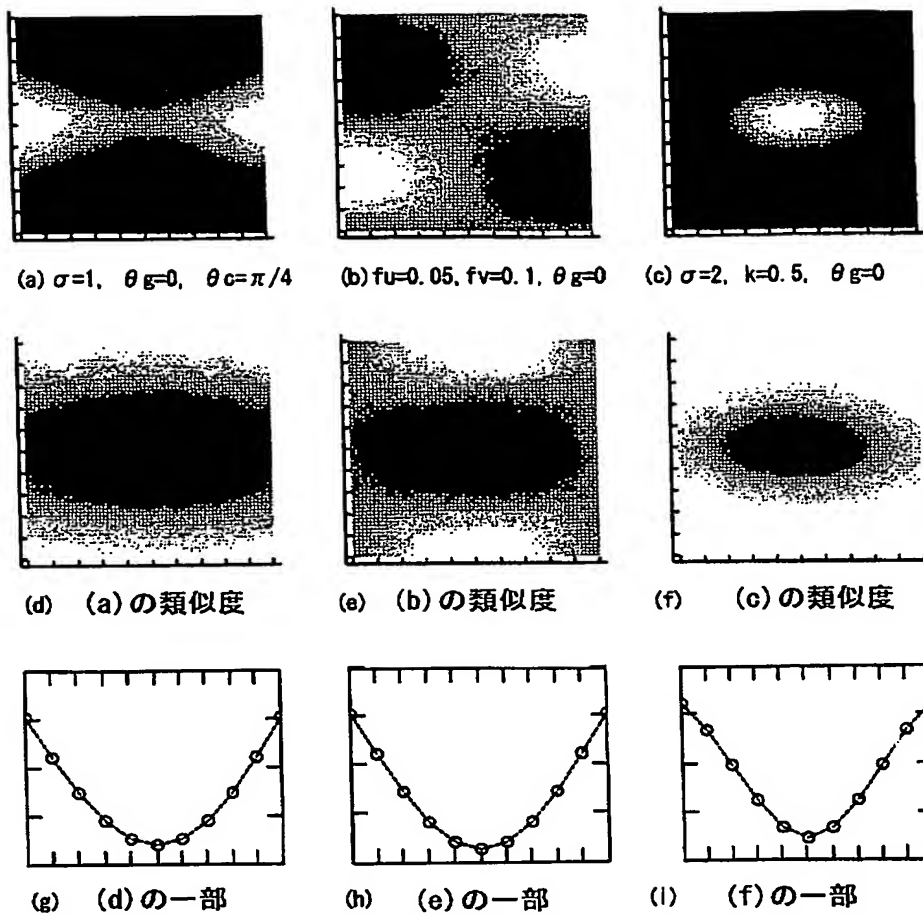
【図 8】



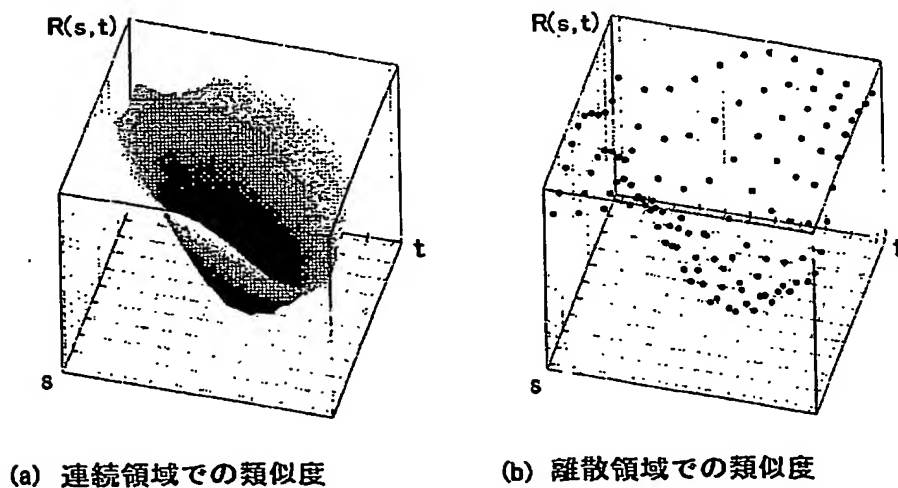
【図 9】



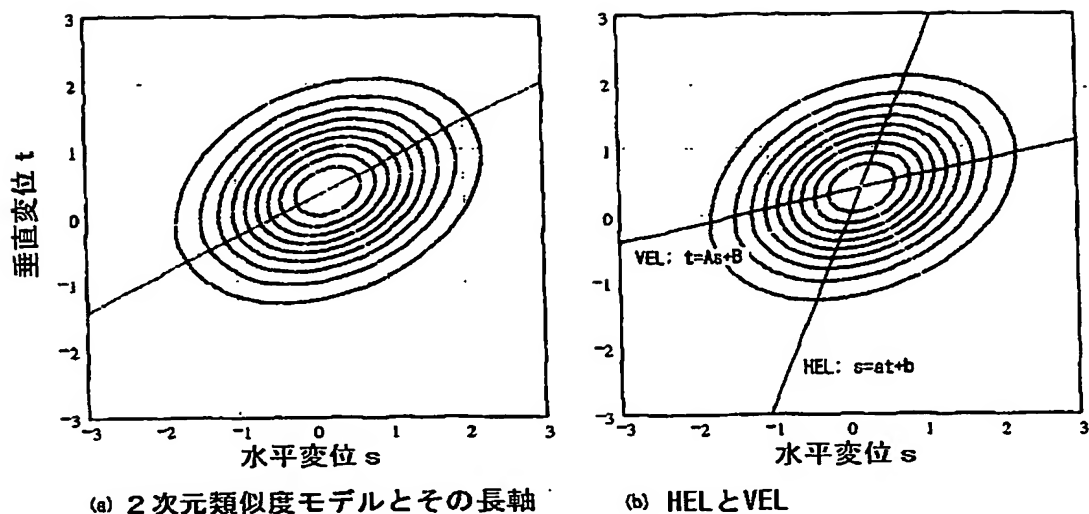
【図 10】



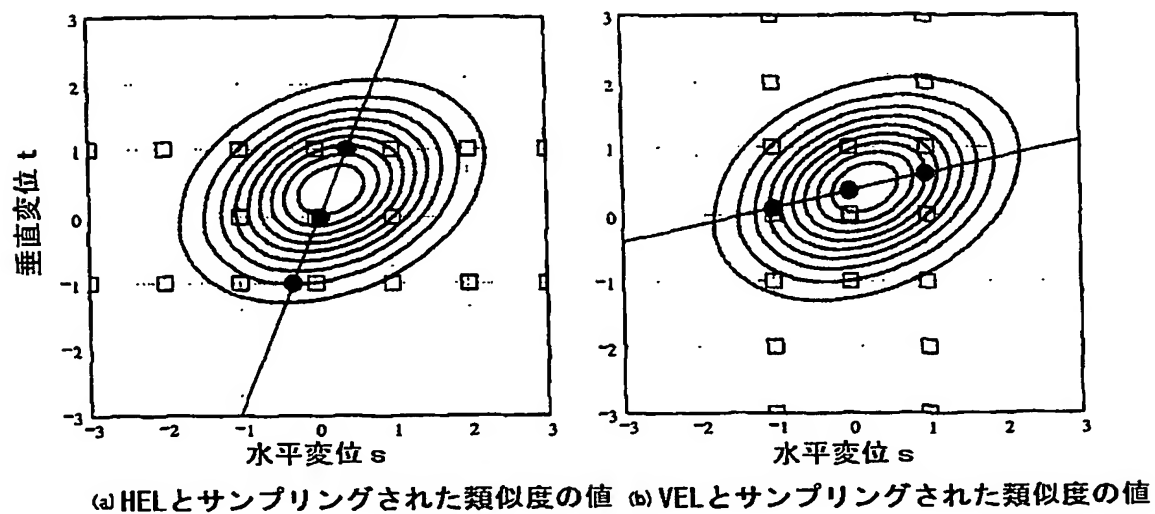
【図 11】



【図 12】

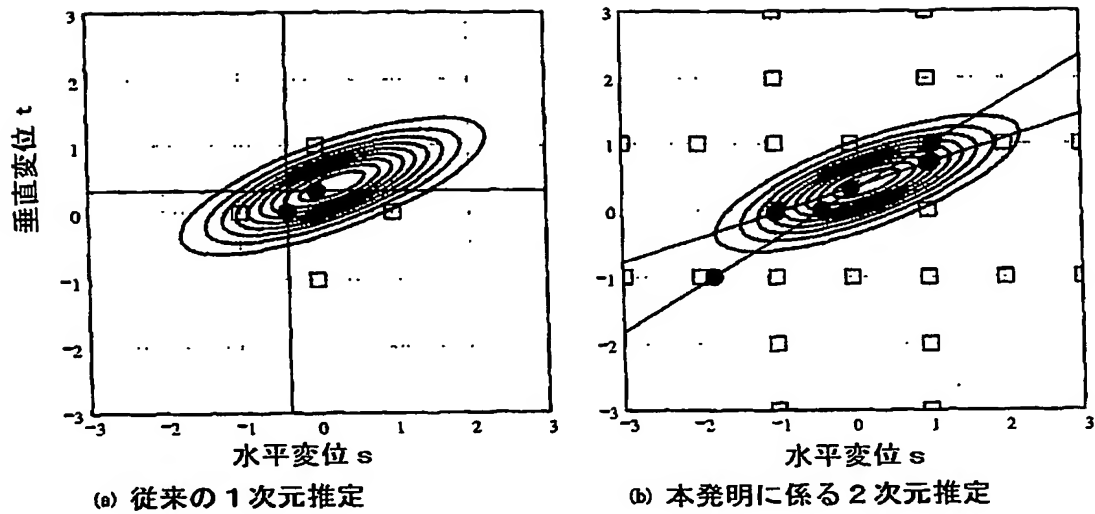


【図 13】





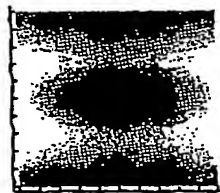
【図 14】



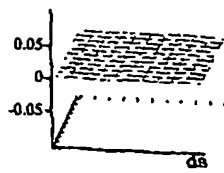
【図 15】



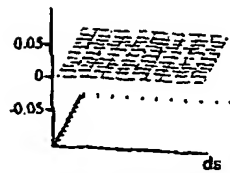
(a) 画像濃度



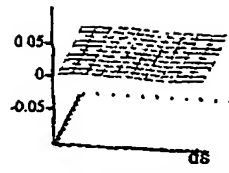
(b) 自己類似度



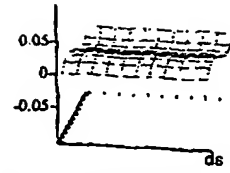
(c)  $d_s$  方向の推定誤差



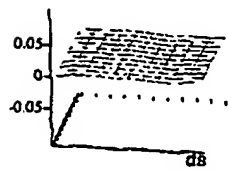
(d)  $d_t$  方向の推定誤差



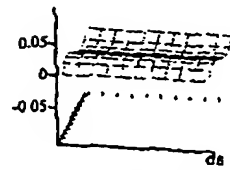
(e)  $d_s$  方向の推定誤差



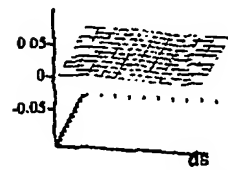
(f)  $d_t$  方向の推定誤差



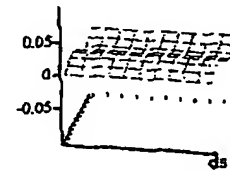
(g)  $d_s$  方向の推定誤差



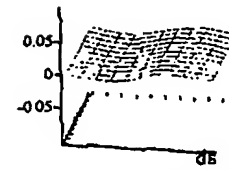
(h)  $d_t$  方向の推定誤差



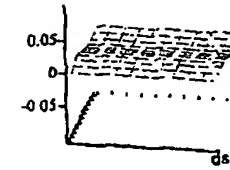
(i)  $d_s$  方向の推定誤差



(j)  $d_t$  方向の推定誤差

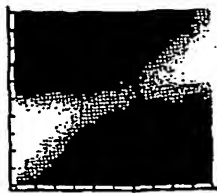


(k)  $d_s$  方向の推定誤差

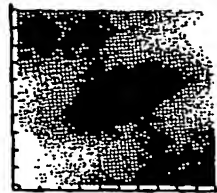


(l)  $d_t$  方向の推定誤差

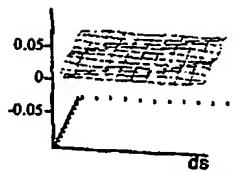
【図 16】



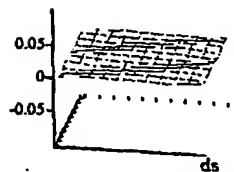
(a) 画像濃度



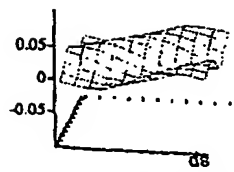
(b) 自己類似度



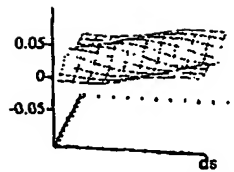
(c)  $d_s$  方向の推定誤差



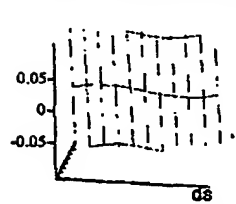
(d)  $d_t$  方向の推定誤差



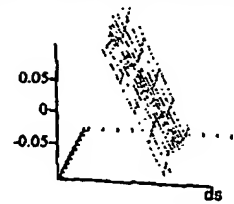
(e)  $d_s$  方向の推定誤差



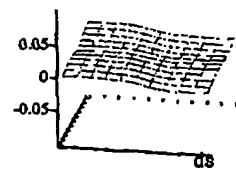
(f)  $d_t$  方向の推定誤差



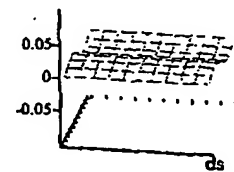
(g)  $d_s$  方向の推定誤差



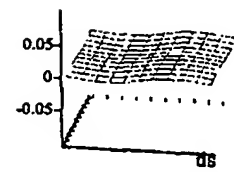
(h)  $d_t$  方向の推定誤差



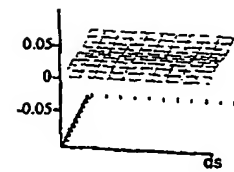
(i)  $d_s$  方向の推定誤差



(j)  $d_t$  方向の推定誤差

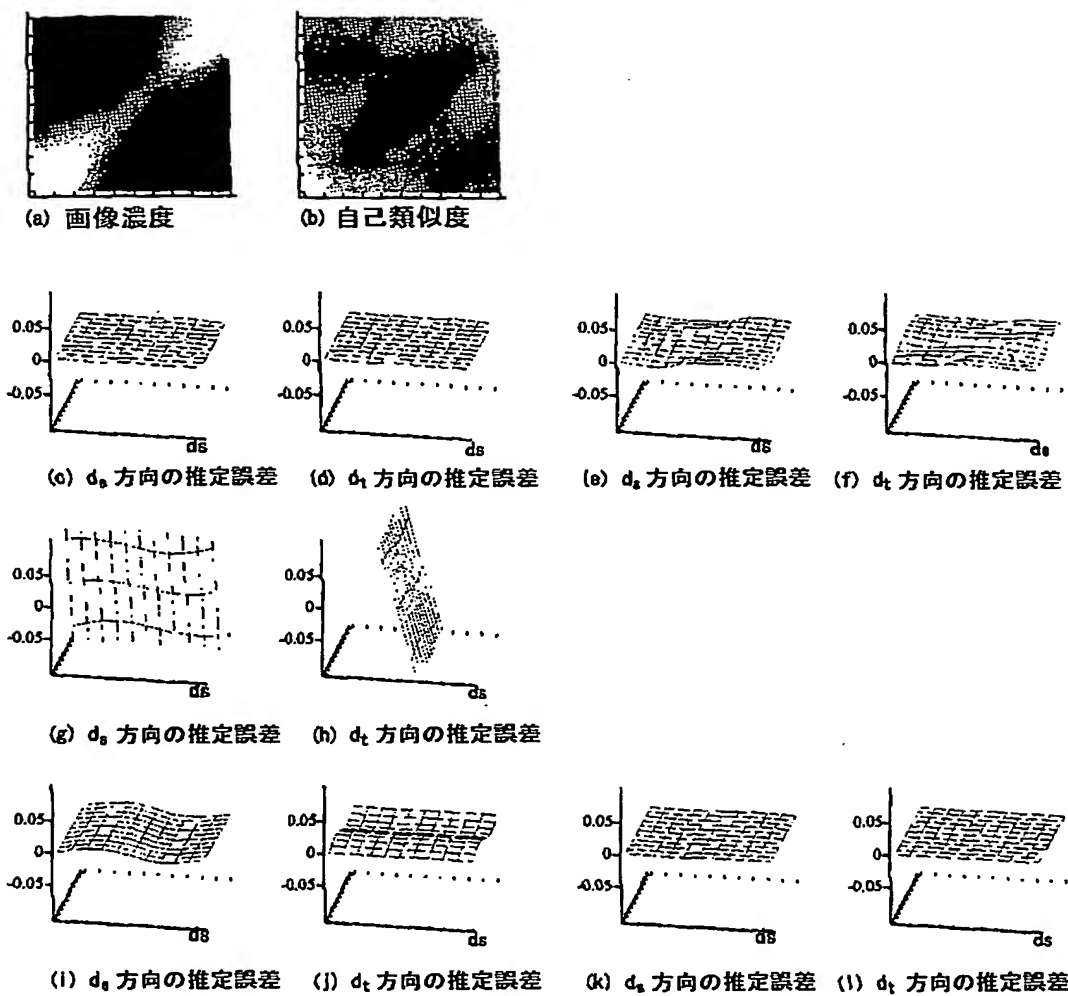


(k)  $d_s$  方向の推定誤差

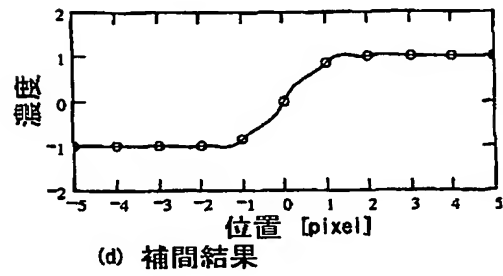
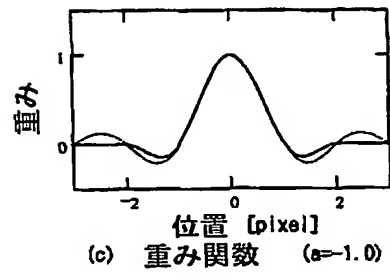
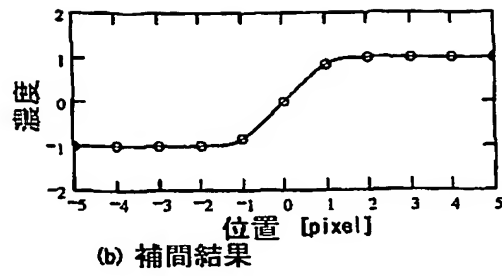
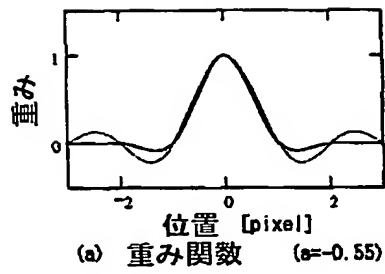


(l)  $d_t$  方向の推定誤差

【図 17】



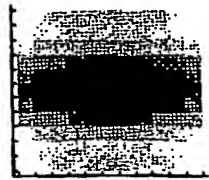
【図 18】



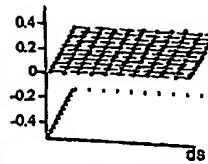
【図 19】



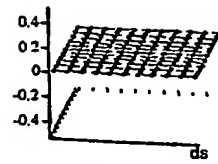
(a) 画像濃度



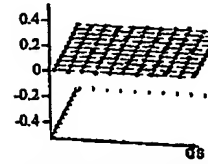
(b) 自己類似度



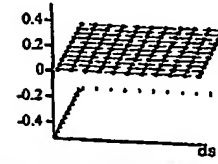
(c)  $d_s$  方向の推定誤差



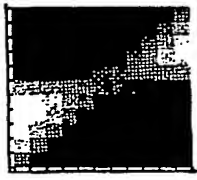
(d)  $d_t$  方向の推定誤差



(e)  $d_s$  方向の推定誤差



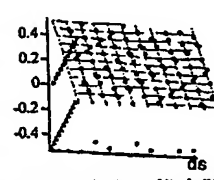
(f)  $d_t$  方向の推定誤差



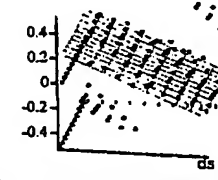
(g) 画像濃度



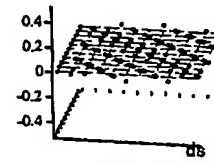
(h) 自己類似度



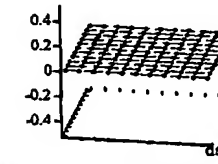
(i)  $d_s$  方向の推定誤差



(j)  $d_t$  方向の推定誤差



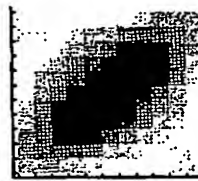
(k)  $d_s$  方向の推定誤差



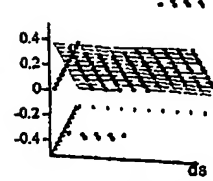
(l)  $d_t$  方向の推定誤差



(m) 画像濃度



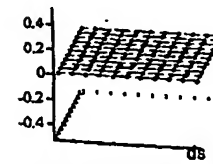
(n) 自己類似度



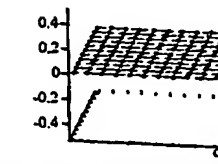
(o)  $d_s$  方向の推定誤差



(p)  $d_t$  方向の推定誤差

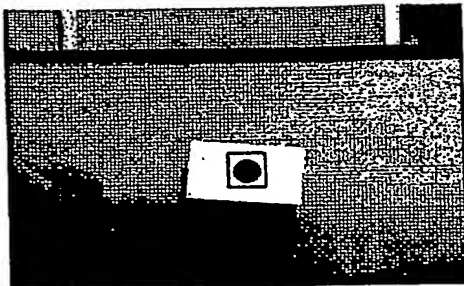


(q)  $d_s$  方向の推定誤差

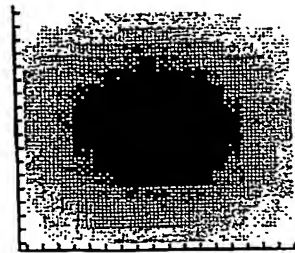


(r)  $d_t$  方向の推定誤差

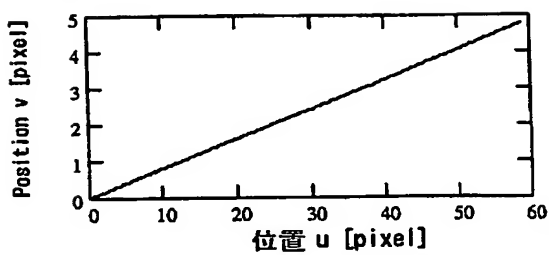
【図 20】



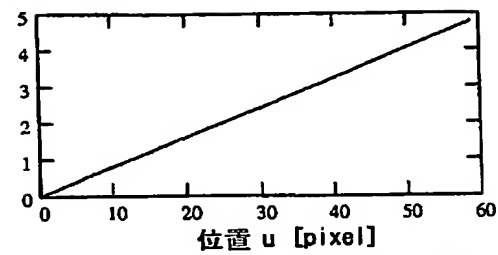
(a) 実験画像



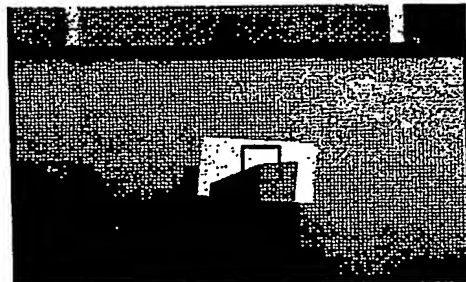
(b) ターゲットの自己類似度



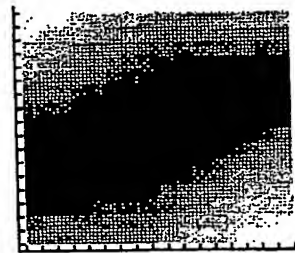
(c) 1D-EECを用いた(a)の計測軌跡



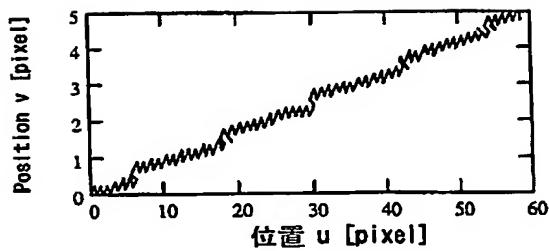
(d) 2D-EECを用いた(a)の計測軌跡



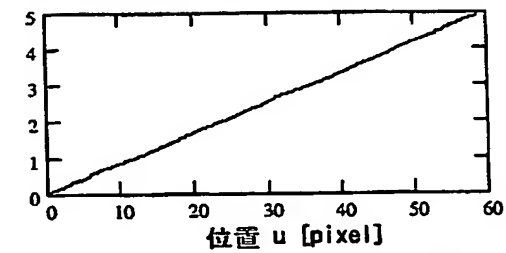
(e) 実験画像



(f) ターゲットの自己類似度

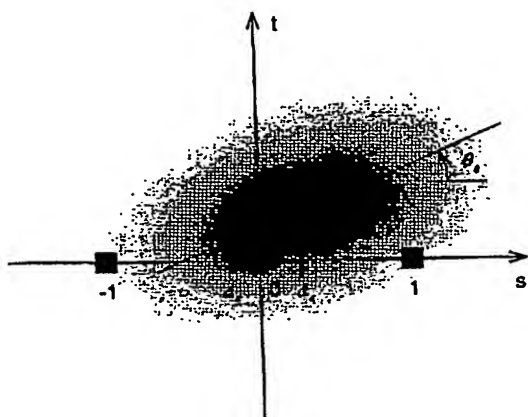


(g) 1D-EECを用いた(e)の計測軌跡



(h) 2D-EECを用いた(e)の計測軌跡

【図 21】





【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 2次元類似度を考慮することで、水平及び垂直方向の画像間変位を同時に高精度に推定できるようにした画像のサブピクセルマッチングにおける高精度2次元推定方法を提供する。

【解決手段】 離散的に得られた画像間の類似度値を利用して、連続領域における2次元類似度最大位置を推定する画像のサブピクセルマッチングにおける高精度2次元推定方法であって、前記画像間の類似度値を使って、水平極値線HEL及び垂直極値線VELを求め、求めた前記水平極値線HELと前記垂直極値線VELの交点を前記2次元類似度最大位置のサブピクセル推定位置とする。

【選択図】 図14



特願 2003-005557

出願人履歴情報

識別番号

[899000013]

1. 変更年月日

1999年 9月17日

[変更理由]

新規登録

住 所

東京都目黒区大岡山2-12-1

氏 名

財団法人理工学振興会

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**